

Univerzita Karlova v Praze

Filozofická fakulta

Ústav hudební vědy

Bakalářská práce

Michal Hadrava

Využití moderních technologií ve vybraných skladbách  
Tristana Muraile

Exploitation of Contemporary Technologies in Selected Compositions by  
Tristan Murail

Děkuji Prof. PhDr. MgA. Milanu Slavickému za neobyčejně vřelé schválení tématu v kontextu české muzikologie tak neobvyklého. Dále děkuji Mgr. Tereze Havelkové za odborné vedení v průběhu celého procesu vzniku této práce, zvláště za nesmírně cenné rady, jak formulovat myšlenky tak, aby výklad byl pro čtenáře co nejprínosnější. Dík za důležité informace z oboru hudební akustiky a hudební informatiky patří Prof. Ing. Václavu Syrovému, CSc. Děkuji také Luboši Mrkvičkovi za ochotné poskytnutí materiálů ke skladbám Tristana Muraille a za podnětné diskuse. Jiřímu Kadeřábekovi patří dík za pozvání na kurz Počítačem podporovaná skladba, který vedl na HAMU, za důležité informace o Tristanu Murailovi a literatuře o něm. Za seznámení se dvěma posledně jmenovanými vděčím Prof. Slavickému. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým dvěma kamarádům: Janu Ehrenbergerovi za kontrolu obsahu fyzikálního výkladu a doporučení, jak výklad zesrozumitelnit, a Štěpánu Bahníkovi za poučení o metodologii experimentální psychologie.

*Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.*

*V Praze dne 18. 8. 2009*

*Michal Hadrava*

## Anotace

V této práci je částečně zrekonstruován postup, jakým Tristan Murail komponoval skladbu *Désintégrations*, a postup, jakým komponoval *Allégories*. Následně je definován obecný model, který lze pozorovat na obou těchto postupech. Je ukázáno, že srovnání teorie tónu s tímto obecným modelem i samotný pojem "spektrum zvuku" vyvolávají otázku, jaký je vztah mezi sluchovým vjemem vybrané části *Désintégrations* nebo *Allégories* a vjemem zvuku, jehož spektrem byla tato část inspirována. Dále je ukázáno, že tento obecný model vyvolává i další otázku, totiž jaký je vztah mezi vjemem souzvuku, jehož tónové výšky jsou odvozeny z určité množiny frekvencí, a vjemem zvuku, jehož frekvenční složky mají kmitočty z té samé množiny. Poté jsou v hrubých rysech navrženy dva experimenty, jejichž účelem je zodpovězení těchto dvou otázek, a nakonec je zváženo, jestli tyto dva experimenty lze podle těchto návrhů realizovat.

## Klíčová slova

*Allégories*, analýza, *Désintégrations*, digitalizace zvuku, FFT, fourierovská analýza, frekvence, hudební akustika, harmonie, hudební informatika, hudební psychologie, nahrávání zvuku, počítačem podporovaná skladba, spektralismus, spektrální hudba, spektrum zvuku, zvuková syntéza, tón, tónová výška, Tristan Murail, zkrácení zvuku, zvuk

## Annotation

At first, the compositional process of Tristan Murail's *Désintégrations* and the compositional process of his *Allégories* are partially reconstructed. Consequently, an abstract model, which applies to both of these compositional processes, is defined. It is demonstrated, that not only the comparison of the theory of timbre with this abstract model, but also the concept "spectrum of sound" itself leads to the question, what is the relation between an auditory percept of a part of *Désintégrations* or *Allégories* and an auditory percept of the sound, whose spectrum served as starting point for this part. Further, it is also demonstrated, that this abstract model leads to the question, what is the relation between an auditory percept of a chord, whose constituent pitches are derived from an aggregate of frequencies, and an auditory percept of a sound, whose partials have frequencies that have been taken from the same aggregate. Finally, the designs of two experiments, whose purpose is to answer these two questions, are outlined and the possibility of implementation of these two experiments examined.

## Keywords

*Allégories*, analysis, computer assisted composition, *Désintégrations*, digitizing of sound, FFT, fourier analysis, frequency, harmony, music acoustics, music informatics, music psychology, pitch, sound, sound distortion, sound recording, sound spectrum, sound synthesis, spectralism, spectral music, timbre, Tristan Murail

# Obsah

1. Úvod.....	6
2. Částečná rekonstrukce vybraných kompozičních procesů.....	10
2.1 Désintégrations.....	10
2.1.1 spektrum zvuku.....	14
2.1.2 Désintégrations, sekce I.....	17
2.1.3 Désintégrations, sekce II a III.....	19
2.1.4 Désintégrations, sekce IV – VII.....	21
2.1.5 Désintégrations, sekce VIII.....	22
2.1.6 Désintégrations, sekce IX – XI.....	24
2.2 Allégories.....	27
2.2.1 postup kompozice.....	31
3. Otázky vyvstávající ze zrekonstruovaných kompozičních procesů.....	34
3.1 obecný model pro zrekonstruované kompoziční procesy.....	34
3.2 otázka vztahu mezi sluchovým vjemem skladby a vjemem zvuku, jehož spektrem byla inspirována.....	35
3.2.1 motivace otázky.....	35
3.2.2 experiment .....	44
3.3 otázka vztahu mezi vjemem souzvuku, jehož tónové výšky jsou odvozeny z množiny frekvencí, a vjemem zvuku, jehož frekvenční složky mají kmitočty z té samé množiny.....	45
3.3.1 motivace otázky.....	45
3.3.2 experiment.....	45
4. Závěr.....	47
5. Bibliografie.....	48

# 1. Úvod

Tato práce se zabývá postupy kompozice dvou vybraných skladeb Tristana Muraille (*Désintégrations* a *Allégories*) z pohledu akustiky a hudební psychologie. Tyto postupy nejprve částečně rekonstruuje a následně si klade určité otázky, které z těchto rekonstrukcí vyvstávají, a navrhuje metody jejich zodpovězení.

Tato práce si zaprvé klade otázku, jaký je vztah mezi sluchovým vjemem vybrané části *Désintégrations* nebo *Allégories* a vjemem zvuku, jehož spektrem byla tato část inspirována.

Zadruhé si tato práce klade otázku, jaký je vztah mezi vjemem souzvuku, jehož tónové výšky jsou odvozeny z určité množiny frekvencí, a vjemem zvuku, jehož frekvenční složky mají kmitočty z té samé množiny.

Pokud je mi známo, podobné otázky si ve vztahu k Murailovým skladbám zatím nikdo nepoložil.

V souvislosti s druhou otázkou je zdánlivě možné opřít se o tuto výpověď skladatele samotného:

“[...] it is for a certain kind of abstract music that a brilliant orchestration will paradoxically be particularly advantageous, and sometimes necessary, for without these trappings it will be either incomprehensible or uninteresting (think, for example, at attempts at the serialization of timbre). On the other hand, spectral structures often have a meaning outside of orchestration; they possess a certain plasticity because they are themselves drawn from the internal organization of timbre. They lend themselves as easily to sine wave realizations (by definition, of course) as to realizations in richer instrumental timbres, which produce effects of spectral multiplication. They are sufficiently pertinent and elastic to endure various treatments or tortures with their identities intact. They allow for games of memorization and recognition that are generally disallowed to combinatorial composition, since the configurations created through the latter's permutations are rarely salient or memorable enough for them to work. Here we have a central property of spectral structures: they allow for the production, at will, of timbre or harmony without conflict or redundancy. This property is liberally exploited in works mixing electronics with acoustic/instrumental

sounds (e.g. Grisey's *Jour, contre-jour* and my *Les Courants de l'Espace* and *Désintégrations*)."<sup>1</sup>

Je důležité si uvědomit, že Murail v citované výpovědi vlastně formuluje hypotézu vnímání "spektrálních struktur". Můžeme tuto hypotézu považovat za pravdivou?

"[Psychoacoustic research] interests me in a general way, but not in a very specific way. Most of the research, while important, has not directly applied to my concerns. At IRCAM, we did an experiment with Stephen McAdams that dealt with the perception of complex spectra (Pressnitzer, McAdams, Winsberg, and Fineberg 1996). I think that there are many things to discover, but I'm limited to my own subjectivity or my own intuition, or let's say, that I am my own subject. However, I am not the best subject, as I would like to be a naive listener and I am not."<sup>2</sup>

Jinými slovy, Murail vychází ze sebereflexe spíše než z psychologických výzkumů, z čehož vyplývá spíše negativní odpověď.

Odpovědí na každou ze dvou výše položených otázek bude určitý vztah mezi akustickým a psychologickým jevem. Vztahy tohoto typu jsou v muzikologické literatuře často formulovány způsobem, který bude zřejmý z následujících dvou citátů:

(1.) "Murail's first mature works were composed around recurring harmonic spectra (e.g. the natural overtone series) whose simple consonances provide easily recognizable 'beacons for the listener in the constant flux of the music' [Anderson cituje skladatele Gérarda Griseyho]. As in Grisey's music from this period [...] the appearance of consonant spectra is explicitly linked with maximum rhythmic regularity [...], creating clear points of rest and stability in the music [...]."<sup>3</sup>

---

1 MURAIL, T. Target Practice. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 151.

2 SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 16.

3 ANDERSON, J. - MURAIL, T. In Harmony: Julian Anderson Introduces the Music and Ideas of Tristan Murail. *The Musical Times*, June 1993, vol. 134, no. 1804, s. 321.

Stejně jako Murail ve výše citované výpovědi tu Anderson vlastně formuluje hypotézu – tentokrát hypotézu vnímání harmonických spekter a pravidelného rytmu v určitém kontextu. Můžeme tuto hypotézu považovat za pravdivou? Nelze jednoznačně odpovědět, jelikož Anderson odkazuje na autoritu (*skladatele* Gérarda Griseyho) bez toho, aby vysvětlila její kompetentnost k zodpovídání otázek spadajících do oboru hudební psychologie. Vychází Grisey z psychologických výzkumů nebo stejně jako Murail spíše ze sebereflexe?

(2.) “The relative consonance of a timbre-chord is both subjective and contextual [...].”<sup>4</sup>

Druhý citovaný výrok je naprosto zřejmou formulací hypotézy vnímání “témbru-akordu”. Můžeme tuto hypotézu považovat za pravdivou? Opět nelze s jistotou odpovědět, jelikož v tomto případě Cornicello dokonce neodkazuje vůbec.

Autoři ve výše citovaných výrocích a ve většině muzikologické literatury při zodpovídání otázky týkající se vztahu mezi akustickým a psychologickým jevem neodkazují na experimentální důkaz. Přitom právě jen experiment umožňuje spolehlivě ověřit pravdivost hypotézy.

Pokud je mi známo, hudební psychologie se doposud zabývala buď jen vztahy mezi souzvuky, nebo jen vztahy mezi témbry, ne však vztahy mezi souzvuky a témbry. V každém případě jsem se v hudebně psychologické literatuře nesetkal s popisy žádných experimentů, které by mohly zodpovědět dvě výše formulované otázky. Primárním cílem této práce je tedy alespoň v hrubých rysech takové experimenty navrhnout.

Sekundárním cílem této práce je ve vztahu k tzv. “spektrální hudbě” (lépe “spektrálnímu přístupu”) upozornit na nutnost kritického přístupu ke spektru jako věrnému zobrazení fyzikálních parametrů zvuku. Spektrum může být případ od případu různě věrné zobrazení fyzikálních parametrů zvuku.

---

4 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 53.



V následující kapitole (2.) bude částečně zrekonstruován postup kompozice *Désintégrations* a postup kompozice *Allégories*. Tyto rekonstrukce jsou základem pro obecný model definovaný později v kapitole 3.1. V kapitole 2.1.1 bude vysvětlen pojem “spektrum zvuku”<sup>5</sup> – centrální pojem tzv. “spektrální hudby” (lépe “spektrálního přístupu”). Na výklad v této kapitole je později navázáno v kapitole 3.2.1. Obě posledně jmenované kapitoly mj. dohromady popisují proces od chvíle, kdy instrumentalista zahraje notu vygenerovanou např. z frekvence vybrané ze spektra nějakého zvuku, do chvíle, kdy kmitající částice vzduchu začnou působit na ušní boltec posluchače. Znalost tohoto procesu je důležitá pro pochopení motivace otázek formulovaných v kapitole 3.

V kapitole 3.1 bude definován obecný model, jehož srovnání s teorií témbu<sup>6</sup> vyvolává, jak uvidíme v kapitole 3.2.1, otázku, jaký je vztah mezi sluchovým vjemem vybrané části jedné ze dvou skladeb Tristana Muraille, *Désintégrations* a *Allégories*, a vjemem zvuku, jehož spektrem byla tato část inspirována. Kapitola 3.2.1 navíc ukazuje, že motivací pro tuto otázku je dokonce i samotný pojem “spektrum zvuku” – jinými slovy že to, co obvykle nazýváme “spektrům zvuku”, nikdy není spektrem zvuku. V kapitole 3.2.2 je v hrubých rysech navržen experiment, který by mohl tuto otázku zodpovědět.

Kapitola 3.3.1 ukazuje, že výše zmíněný obecný model vyvolává i další otázku, totiž jaký je vztah mezi vjemem souzvuku, jehož tónové výšky jsou odvozeny z určité množiny frekvencí, a vjemem zvuku, jehož frekvenční složky mají kmitočty z té samé množiny. V kapitole 3.3.2 je opět navržen experiment, který tuto otázku zodpoví.

- 
- 5 Informace z oboru akustiky a informatiky prezentované v této práci vychází ze znalostí, které jsem nabyl studiem literatury (Např. EBERLEIN, R. – AUHAGEN, W. – SCHROEDER, M. R. – EILEMANN, A. Akustik. In *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*. Ludwig Finscher. 2. neubearb. Ausg. Kassel: Bärenreiter – Stuttgart: Metzler, 1994 – 2008. Sachteil. Bd. 1 (A – Bog). Kol. 366 – 421. ISBN-10: 3476410226. ISBN-13: 978-3476410221; SYROVÝ, V. *Malý slovník základních pojmů z hudební akustiky a hudební elektroniky*. Praha, 2001. ISBN 80-85883-80-5.), konzultací s prof. Ing. Václavem Syrovým, CSc., navštěvováním kurzu Základy elektroakustické hudby, který vedl Doc. MgA. Pavel Kopecký, a studiem programů MAX/MSP (Max/MSP/Jitter [počítačový program]. Ver. 5.0.7. Cycling '74, 2009 [cit. 2009-08-12]. Dostupný za 699 USD z: <<http://www.cycling74.com/products/max5>>) a Pure Data (Pure Data [počítačový program]. Ver. 0.41.4. Miller Puckette a další, 2009 [cit. 2009-08-12]. Freeware. Dostupný z: <<http://puredata.info/downloads>>. Popsaný např. v: PUCKETTE, M. Pure Data. In *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference*. San Francisco: International Computer Music Association, 1996, s. 269-272). Čtenář si i tyto informace může ověřit v jakýchkoliv relevantních a dostatečně spolehlivých a aktuálních zdrojích, přednostně doporučuji ty, na které odkazuji v předchozí větě.
- 6 Informace z oboru hudební psychologie prezentované v této práci vychází ze znalostí, které jsem nabyl studiem literatury (Např. DEUTSCH, D. *The Psychology of Music*. 2nd Ed. San Diego: Academic Press, 1999. ISBN-13: 978-0-12-213565-1. ISBN-10: 0-12-213565-2; FRANĚK, M. *Hudební psychologie*. Praha, 2007. ISBN 80-246-0965-7.) a navštěvováním cyklu přednášek z hudební psychologie doc. PhDr. Marka Fraňka, Csc., Ph. D. Čtenář si tyto informace může ověřit v jakýchkoliv relevantních a dostatečně spolehlivých (!) a aktuálních (!) zdrojích, přednostně doporučuji ty, na které odkazuji v předchozí větě.

## 2. Částečná rekonstrukce vybraných kompozičních procesů

### 2.1 Désintégrations

Skladbu *Désintégrations* pro sedmnáctičlenný instrumentální ansámbl a elektroniku komponoval Murail v letech 1982 – 1983 na objednávku IRCAM (viz tabulku) a při premiéře 15. února 1983 v IRCAM v Paříži vedl Ensemble Intercontemporain Péter Eötvös. Skladba poprvé vyšla tiskem u Éditions Salabert v Paříži roku 1990.<sup>7 8</sup>

#### IRCAM

Roku 1970 pověřil tehdejší francouzský prezident Georges Pompidou skladatele a dirigenta Pierra Bouleze založením a vedením institutu pro výzkum související se soudobou hudbou přidruženého k budoucímu Musée National d'Art Moderne, později Centre Georges Pompidou. O sedm let později byl IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) uveden do plného provozu s Pierrem Boulezem jako ředitelem. Od té doby IRCAM rozvíjel svoje aktivity v souladu s původním záměrem být místem, kde se skladatelé, vědci a technici dohromady podílejí na obnově soudobé hudby produkcí znalostí a technologií relevantních ke kompozici, interpretaci a poslechu hudby. Výzkum zpočátku probíhal pod záštitou pěti různě zaměřených oddělení, každého pod vedením specialisty: první oddělení bylo zaměřeno na elektroakustiku, druhé na počítače, třetí na pedagogiku, čtvrté na hudební nástroje a páté na zpěvný hlas. Roku 1980 a pak znovu roku 1984 došlo k reorganizaci: většina původních cílů byla zachována, IRCAM se však zaměřil primárně na tvorbu počítačem podporované hudby a související výzkum. Roku 1992 Laurent Bayle nahradil Pierra Bouleze na postu ředitele IRCAM. V současnosti institut sestává z pěti oddělení: Recherche & Développement (výzkum hudebních jevů spadající do oblasti fyziky, zpracování zvukového signálu, informatiky, kognitivní psychologie a muzikologie, vývoj technologií), Création & Diffusion (realizace uměleckých projektů), Pédagogie & Action Culturelle (organizace mítinků, vzdělávacích projektů a školení pro hudební profesionály, vysokoškolské učitele, studenty a širokou veřejnost), Médiathèque (zpřístupňuje materiály k soudobé hudbě: knihy, noty, články v digitální podobě, fotografie, nahrávky z koncertů, videa, CD, atd.) a Médiations Recherche/Création (zprostředkovává produktivní spojení mezi vědeckými a uměleckými komunitami v IRCAM i s partnery mimo institut).<sup>9 10 11</sup>

7 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 127. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

8 MURAIL, T. *Desintegrations: Pour bande synthétisée et 17 instruments*. Paris: Editions Salabert, 1990.

9 MANNING, P. Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique. In *Grove Music Online*. Oxford Music Online. <<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/42130>> [cit. 2009-08-13].

Syntetické zvuky byly vytvořeny technikou součtové syntézy (viz první tabulku na s. 12) na syntezeátoru Sogitec 4X (viz druhou tabulku na s. 12) v IRCAM. Syntezeátor byl vybaven programem pro syntézu zvuku, který speciálně pro projekt *Désintégrations* napsal Andrew Gerzso. Syntéza každého ze zvuků vyžadovala definování několika set parametrů (bylo nutné definovat každý parametr každé z frekvenčních složek požadovaného zvuku). Murail napsal na centrálním počítači v IRCAM program *Syntad*, který vypočítával tyto parametry z relativně malého množství uživatelem zadaných dat, která reprezentovala globální charakteristiky požadovaného zvuku.<sup>12 13 14</sup>

V době premiéry *Désintégrations* neměl Murail k dispozici žádnou počítačovou technologii, která by umožňovala jednoduše přehrávat syntetické zvuky z počítače v reálném čase (v době premiéry *Allégories* už takovou technologii k dispozici měl – viz úvod kapitoly 2.2). Proto se syntetické zvuky musely nahrát na magnetofonovou pásku, která při provedení *Désintégrations* běží bez přerušení od začátku skladby do konce.<sup>15</sup>

Kvůli koordinaci mezi ansámblem a páskou při provádění skladby poslouchá dirigent přes sluchátka sérii impulsů, které odpovídají dobám a taktům v partituru. Tato série impulsů se přehrává ze čtvrté stopy pásky.<sup>16 17 18</sup>

10 VINET, H. Recent Research and Development at IRCAM. *Computer Music Journal*, Fall 1999, vol. 23, no. 3, s. 9—17.

11 WWW Ircam: Accueil [online]. Modified August 12, 2009 1:17:49 AM [cit. 2009-08-12]. <<http://www.ircam.fr/>>.

12 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 142.

13 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 127. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

14 SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 14.

15 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 221.

16 Tamtéž.

17 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 127. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

18 MURAIL, T. *Desintegrations: Pour bande synthétisée et 17 instruments*. Paris: Editions Salabert, 1990., s. 8.

### **součtová syntéza**

Při součtové syntéze vzniká zvuk sčítáním kmitů, nejčastěji sinusových. Sčítají se kmity mechanické (např. u varhanní mixtury), elektrické (např. u analogových syntezátorů) nebo jejich digitální ekvivalenty. Syntéza probíhá tak, že každá okamžitá výchylka jednoho kmitu se sčítá s příslušnými okamžitými výchylkami ostatních kmitů.<sup>19</sup>

### **Sogitec 4X**

4X byla čtvrtá generace v řadě zařízení pro zpracování digitálního signálu v reálném čase používaných v IRCAM nejen pro transformace zvuků, ale také pro jejich analýzu a syntézu. Prototyp navrhl a sestavil Giuseppe Di Giugno v IRCAM roku 1980, přičemž mu asistoval Michel Antin, a konečnou verzi vyrobila roku 1984 společnost SOGITEC. 4X byl schopen provést 200 milionů operací za sekundu. Sestával z osmi procesorových desek, z nichž každá mohla být nezávisle naprogramována jakoukoliv kombinací metod pro zpracování digitálního signálu. Např. při součtové syntéze (viz předchozí tabulku) se zvuk vypočítával součtem digitálních ekvivalentů velkého množství sinusových kmitů. Každá procesorová deska 4X byla schopna generovat digitální ekvivalenty 129 sinusových kmitů zároveň. Každá deska mohla být navíc naprogramována tak, aby fungovala jako soustava 128 filtrů, které se daly použít k transformaci zvuku v reálném čase. Každá z procesorových desek měla také vlastní paměť, do které se daly uložit až 4 sekundy zvuku (v digitální podobě), které pak mohly být přehrávány podle jakéhokoli rytmického vzorce. Základní operace potřebné pro práci s digitálním signálem byly uloženy v tzv. modulech (samostatných podprogramech), které se daly propojovat tak, že výstup z jednoho modulu byl vstupem pro další modul. Moduly samotné se stejně jako propojení mezi nimi programovaly pomocí tzv. "patches" (srov. tabulku na s. 8) – programů vyšší úrovně napsaných v programovacím jazyce, který navrhnul Andrew Gerzso a vytvořil Patrick Potacsek a Emmanuel Favreau. Jednotlivé "patches" se ukládaly na magnetický disk počítače, do kterého byly procesorové desky zapojeny, a mohly být do 4X zavedeny do půl sekundy. Tento počítač byl vybaven operačním systémem a plánovačem úloh, který vyvinul Miller Puckette, Michel Fingerhut a Robert Rowe a který určoval, jaký má kdy 4X spustit program.<sup>20 21</sup>

19 RISSET, J.-Cl. – WESSEL, D. L. Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis. In *The Psychology of Music*. Diana Deutsch. 2nd Ed. San Diego: Academic Press, 1999. s. 118 – 126. ISBN-13: 978-0-12-213565-1. ISBN-10: 0-12-213565-2.

20 BOULEZ, P. – GERZSO, A. Computers in Music. *Scientific American*, April 1988, vol. 258, no. 4, s. 40 – 54.

21 SCHUTTERHOEF, Arie van. *wikiC/2.06: Sogitec 4X* [online]. Modified August 12, 2009 1:25:00 AM [cit. 2009-08-12] <[http://knorretje.hku.nl/wiki/Sogitec\\_4X](http://knorretje.hku.nl/wiki/Sogitec_4X)>.

Protože nebylo možné vytvořit více než 30 digitálních ekvivalentů sinusových kmitů zároveň, syntetizoval se každý zvuk po vrstvách a ty se pak pomocí analogového mixážního pultu s 16 vstupy smísily na pásku. Skupina asistentů měla za úkol spouštět nahrávání jednotlivých zvuků v synchronizaci s impulsy, které byly nahrány předtím.<sup>22 23</sup>

Murail napsal na počítačích v IRCAM programy pro zpracování spekter (viz kapitolu 2.1.1), pro výpočty rytmických hodnot, výpočty frekvenční a kruhové modulace a pravděpodobně i pro převádění spekter do notace a naopak. V *Désintégrations* byl kromě syntézy zvuku počítač využit také při výběru frekvencí ze spekter, výpočtech rytmických délek, a s velkou pravděpodobností také při výpočtu frekvenční a kruhové modulace a při psaní orchestrální partitury. To pravděpodobně umožnily tyto programy.<sup>24 25</sup>

Kmitočty použité jako parametry pro aditivní syntézu pocházely ze stejných množin frekvencí, ze kterých byly odvozeny tónové výšky pro instrumentální party. Tyto množiny frekvencí byly různého původu: buď byly vybrány ze spekter uložených v textových souborech, která zobrazovala výsledky analýz zvuků několika hudebních nástrojů, nebo byly vybrány z transpozic těchto spekter, byly z množin frekvencí vybraných z těchto spekter nebo jejich transpozic odvozeny nebo byly výsledkem výpočtu algoritmem simulujícím frekvenční modulaci (viz tabulku na s. 22) nebo kruhovou modulaci (viz tabulku na s. 19). Zmíněné analýzy provedl (zjevně ne speciálně pro projekt *Désintégrations*) David Wessel v IRCAM. Pro vytvoření instrumentálních partů byla každá z vybraných frekvencí nahrazena tónovou výškou čtvrttónového nebo půltónového (v sekcích s rychlými tempy) systému odpovídající nejbližší frekvenci.<sup>26 27 28</sup>

---

22 SMITH, R. B. An Interview with Tristan Murail. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 14.

23 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 127. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

24 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 141.

25 SMITH, R. B. An Interview with Tristan Murail. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 16.

26 Tamtéž, s. 12, 13.

27 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 211.

28 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 141.

### 2.1.1 spektrum zvuku

Abychom pochopili, co je to spektrum resp. **spektrum zvuku**, je třeba nejprve vědět, co je to **zvuk**. Že pojem “zvuk” je třeba objasnit, nemusí být na první pohled zřejmé. Lze namítnout, že je to jednoduše to, co slyšíme. “To, co slyšíme”, je však náš subjektivní vjem zvuku, není to zvuk samotný. Zvuk je ve skutečnosti **mechanické kmitání** šířící se ve formě **postupného vlnění** (viz s. 38) **pružným prostředím**.

Prvním z pojmů použitých v definici zvuku, které je třeba vysvětlit, je **mechanické kmitání**. Příkladem mechanického kmitání je pohyb struny kytary v místě drnknutí: hráč vychýlí strunu kytary z polohy, ve které byla relativně k ostatním částem nástroje nehybná. K tomu potřebuje určitou sílu, protože struna má snahu vrátit se do původní polohy – je pružná. Čím více hráč strunu vychyluje, tím větší silou – tzv. pružnou silou – mu struna brání v dalším vychylování a snaží se vrátit zpět. Právě pružná síla způsobí, že se struna, jakmile ji kytarista pustí, začne v místě drnknutí pohybovat zpět do počáteční polohy. Vlivem setrvačnosti však počáteční polohu míjí a pokračuje v pohybu, dokud ji vzrůstající pružná síla nezastaví a nerozpohybuje zpět do počáteční polohy. Prozatím nebudeme sledovat její další pohyb.

Abychom získali představu, co přesně je mechanické kmitání, je třeba ukázat, které rysy má předchozí příklad společné se všemi jevy, které shrnujeme pod pojem “mechanické kmitání” – je třeba definovat obecný model mechanického kmitání. Písmenné značky slouží pro odlišení dvou různých sil:

Síla  $F_1$  (síla, kterou kytarista působí na strunu, síla, kterou při úderu paličkou působí bubeník na blánu, atd.) vychýlí bod pružného prostředí (místo drnknutí kytarové struny, místo úderu paličky do blány bubnu atd.) z rovnovážné polohy (poloha, ve které je struna kytary, blána bubnu atd. relativně k ostatním částem nástroje nehybná) a ve stejnou chvíli na tento bod začne působit pružná síla –  $F_2$  (síla, kterou se struna kytary, blána bubnu atd. snaží vrátit do původní polohy). Síla  $F_1$  přestane na tento bod působit a síla  $F_2$  ho uvede do pohybu směrem k rovnovážné poloze. Vlivem setrvačnosti však tento bod rovnovážnou polohu míjí a pokračuje v pohybu. Velikost síly  $F_2$  roste přímo úměrně k vzdálenosti tohoto bodu od rovnovážné polohy (okamžité výchylky) tak dlouho, až překoná setrvačnost tohoto bodu a uvede ho do pohybu zpět k rovnovážné poloze. Jakmile se pak tento bod ocitne (byť jen dočasně) v rovnovážné poloze, má za sebou jeden tzv. kmit.

Abychom mohli správně zhodnotit, jakou informaci nám podává spektrum zvuku o

zvuku samotném (viz s. 42), nesmíme zůstat u obecného modelu jednoho mechanického kmitu. Vraťme se tedy opět k příkladu kytarové struny a sledujme další vývoj jejího pohybu v místě drnknutí:

Pokud se kytarista struny už dále nedotýká, její pohyb postupně ustává, až se struna ustálí v počáteční poloze.

Obecný model jednoho mechanického kmitu bodu pružného prostředí tedy můžeme rozvinout na obecný model **volného tlumeného kmitání** bodu pružného prostředí:

Pokud síla  $F_1$  už dále na bod pružného prostředí nepůsobí, vykonává tento bod další kmitu kolem rovnovážné polohy (kmitání je volné), jeho pohyb však vlivem tření a odevzdávání energie okolnímu prostředí ustává, až se tento bod zastaví v rovnovážné poloze (kmitání je tlumené).

Příkladem mechanického kmitání je i pohyb struny houslí v místě smyku při tahu smyčcem:

Struna se přichytí na žíně smyčce a je jím následně konstantní rychlostí vychylována z rovnovážné polohy. Jakmile je tření, které drží strunu přichycenou na žíních, překonáno pružnou silou struny, část struny ležící pod smyčcem se uvolní a vymrští zpět. Ihned se však zas přichytí na smyčec a znovu je jím konstantní rychlostí vychylována.

Oba předchozí příklady pocházely z oblasti chordofonů. Protože následující model tzv. samobuzeného kmitání bude možná hůře pochopitelný, bude vhodné uvést ještě alespoň jeden příklad – tentokrát z jiné skupiny nástrojů. Příkladem z okruhu aerofonů je pohyb jazýčku varhanní píšťaly:

Jazýček je jedním koncem upevněn v hlavě píšťaly a pomocí dřevěného klínu přitlačen ke kovové trubičce, která je na jednom konci uzavřená a podélně seříznutá (jazýček se nachází proti tomuto podélnému seříznutí). V klidovém stavu zůstává mezi jazýčkem a trubičkou malá štěrbina. Otevřeným horním koncem ústí trubička do trubice se vzduchovým sloupcem (tzv. násada). Vzduch, který proudí do píšťaly štěrbinou, stiskne-li varhanník odpovídající klávesu, vyvolává ve štěrbině nárůst dynamického tlaku na úkor statického. Jelikož statický tlak na straně jazýčku odvrácené od trubičky zůstává stejný, je statický tlak na této straně větší než statický tlak ve štěrbině. V důsledku tohoto rozdílu statického tlaku je jazýček přitlačen k trubičce, což má za následek přerušení přívodu vzduchu do násady. V tu chvíli statický tlak ve štěrbině opět stoupne, jazýček se vlivem pružnosti rozpohybuje směrem k rovnovážné poloze, přes kterou však kvůli setrvačnosti překmitne a rozšíří tak štěrbinu na maximum, čímž umožní maximální proudění vzduchu do násady, které však opět způsobí

pokles statického tlaku ve štěrbině a celý děj se opakuje.

Obecný model jednoho mechanického kmitu bodu pružného prostředí tedy můžeme alternativně rozvinout na obecný model tzv. **samobuzeného kmitání** bodu pružného prostředí:

Působí-li na bod pružného prostředí (místo smyku struny houslí, volný konec jazýčku varhanní píšťaly atd.) neperiodická síla (tah smyčcem, proud vzduchu z měchu atd.) a vymaňuje-li se tento bod z jejího působení vždy, když ho tato síla vychýlí z rovnovážné polohy (když pružná síla struny houslí překoná tření mezi ní a smyčcem, když jazýček varhanní píšťaly přitlačením k trubičce přeruší proud vzduchu ve štěrbině atd.), jeho kmitání neustává (kmitání je samobuzené).

Ve výše popsaných obecných modelech kmitání figuroval pojem **pružné prostředí**, se kterým jsme se setkali i přímo v definici zvuku. Kdyby totiž prostředí nebylo pružné (tzn. nemělo by snahu vrátit se po deformaci do původního tvaru), znamenalo by to, že neexistuje žádná síla, která by po tom, co síla  $F_1$  přestane na bod tohoto prostředí působit, ho vymrštila zpět k rovnovážné poloze, kterou by vlivem setrvačnosti minul atd.

Představme si nyní, že bychom mohli sledovat nějaký náhodně vybraný kmitající bod a zanášet jeho vzdálenost od rovnovážné polohy v jednotlivých okamžicích (tzv. okamžitou výchylku) do grafu závislosti okamžité výchylky na čase. S velkou pravděpodobností by se nám postupně vykreslila funkce, kterou nebudeme schopni identifikovat jako jednu ze základních funkcí, které jsme se učili na střední škole (např. sinus, cosinus atd.). Možná bychom však správně tušili, že takovou funkci bychom mohli získat sečtením některých ze základních funkcí. Kmitající body pružných prostředí, se kterými se obvykle setkáváme, totiž zpravidla vykonávají více kmitů zároveň. To může být obtížně představitelné, proto si to ukážeme na jednoduchém příkladu:

Dítě houpající se na houpačce vlastně kmitá. Stejně tak kmitají jeho chodidla, když dítě pohybuje nohama dopředu a dozadu, aby se nepřestalo houpat nebo aby se rozhoupalo ještě víc. Chodidla kmitají tam a zpátky relativně k sedícímu dítěti, zároveň však s dítětem kmitají tam a zpátky relativně k statické konstrukci houpačky – vykonávají dva kmity zároveň.

Stejným způsobem vykonává dva i mnohem více kmitů zároveň většina kmitajících bodů pružných prostředí, se kterými se obvykle setkáváme. Tyto kmity (tzv. **frekvenční složky**) mají sinusový průběh (jsou to tzv. **sinusové** nebo **harmonické kmity**) a každý má určitý **kmitočet** (nebo také tzv. **frekvenci** – obojí vyjadřuje počet kmitů, které bod vykoná za sekundu), **maximální výchylku** (nebo také tzv. **amplitudu** – obojí vyjadřuje maximální



vzdálenost od rovnovážné polohy, které bod při kmitu dosahuje) a **fázi** (dva kmity se stejnou amplitudou a frekvencí mají různou fázi, právě když každý z nich dosahuje maximální výchylky v jiném okamžiku). V případě volného kmitání (viz s. 15) nebo samobuzeného kmitání (viz s. 15 – 16) jsou kmitočty frekvenčních složek determinovány fyzikálními vlastnostmi pružného prostředí (frekvenční složky jsou **vlastními kmity** prostředí, jejich frekvence **vlastními frekvencemi** prostředí).

**Spektrem kmitání** pak nazýváme numerické nebo grafické vyjádření závislosti amplitudy nebo fáze na kmitočtu – ve spektru kmitání je každému kmitočtu přiřazena amplituda nebo fáze, která (v ideálním případě – viz s. 35 – 43) odpovídá amplitudě nebo fázi frekvenční složky kmitání s tímto kmitočtem.

Tedy tedy víme, co je to spektrum kmitání, a protože podle definice (viz s. 14) je i zvuk kmitání, víme také, co je to **spektrum zvuku**. Nejčastěji se setkáme se spektrem zvuku ve formě grafu závislosti amplitudy na frekvenci. V takovém grafu se tak např. zvuk obsahující pouze jednu frekvenční složku zobrazí (v ideálním případě – viz s. 42 – 43) jako svislá čára.

### 2.1.2 Désintégrations, sekce I

Množiny frekvencí použité při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu zvuků v této sekci byly transformací odvozeny z množiny frekvencí vybraných ze spektra krátkého počátečního úseku zvuku noty C<sub>4</sub> (tj. kontra C) zahrané na moderní klavír.<sup>29 30</sup> Toto spektrum zobrazovalo 118 frekvenčních složek.<sup>31</sup> Z těchto 118 zobrazených složek byly ty s amplitudou blížící se nule eliminovány, takže jich zůstalo pouze 91.<sup>32</sup> Spektrum zobrazující už pouze 91 frekvenčních složek bylo transponováno tak, že základní tón<sup>33</sup> už neodpovídal C<sub>4</sub>, ale Ais<sub>4</sub>, (tj. subkontra Ais). Z kmitočtů 91 frekvenčních složek zobrazených v tomto

29 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 212.

30 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 141.

31 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 190.

32 Tamtéž.

33 Tónová výška, jejíž vjem by vyvolal zvuk s tímto spektrem.

spektru se základním tónem Ais, , Murail vybral ty odpovídající lokálním amplitudovým maximům (tzv. formantám). Druhá množina frekvencí vznikla transpozicí původního spektra se základním tónem C, na spektrum se základním tónem Cis (tj. velké Cis). Z kmitočtů 91 frekvenčních složek zobrazených v tomto spektru se základním tónem Cis Murail opět vybral ty odpovídající lokálním amplitudovým maximům. Z každé z těchto dvou množin frekvencí Murail vybral určitý počet podmnožin.<sup>34 35</sup>

Kompozičním problémem, který Murail řešil, bylo nalézt pro podmnožiny každé z výše popsaných dvou množin frekvencí zvlášť funkci vyjadřující závislost délky časových úseků na jejich pořadí. Tyto časové úseky měly stanovit všem frekvencím každé z podmnožin společný práh, kdy nejdříve se mohou objevit, a společný práh, kdy nejpozději musí zmizet. Murail hledal takové dvě funkce, které by umožnily, aby se časové úseky vymezené podmnožinám první množiny frekvencí určitým způsobem překrývaly s těmi vymezenými podmnožinám druhé množiny frekvencí – řešil problém "[...] how to make two curves converge in a harmonious manner, while still creating two convincing continuous rallentandi, and making all of this occur in a set period of time."<sup>36</sup> Protože Murail neměl k dispozici počítačový program, který by mu pomohl tento problém vyřešit, použil graf, do kterého ručně zakresloval vždy dvě funkce – každá z nich vyjadřovala závislost délky časových úseků vymezených podmnožinám jedné z množin frekvencí na času začátku těchto úseků.<sup>37</sup> Murail popisuje, jak při hledání dvou funkcí splňujících jeho požadavky postupoval: "[...] I had to proceed by successive approximations, through 'trial and error', modifying the initial parameters, etc."<sup>38</sup>

Ve výsledku se začátky časových úseků vymezených podmnožinám první z množin frekvencí střídají více méně nepravidelně se začátky časových úseků vymezených podmnožinám z druhé množiny frekvencí. Zároveň doba mezi začátkem časového úseku vymezeného podmnožině první z množin frekvencí a nejbližším začátkem časového úseku vymezeného podmnožině druhé z množin frekvencí se postupně zkracuje a poslední čtyři

---

34 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 212, 213, 214.

35 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 141—142.

36 Tamtéž, s. 216.

37 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 214—215, 216, 234.

38 Tamtéž, s. 216.

časové úseky vymezené podmnožinám obou množin frekvencí začínají současně. V závislosti na pořadí jsou do podmnožin každé z množin frekvencí přidávány stále nižší frekvence z “mateřské” množiny. V druhé z posledních čtyř množin frekvencí, z nichž každá slučuje jednu podmnožinu z první množiny frekvencí s jednou podmnožinou z druhé množiny frekvencí, které byl vyhrazen shodný časový úsek, byla nejvyšší frekvence transponována o oktávu níž, ve třetí z nich byla nejvyšší frekvence transponována o dvě oktávy níž a ve čtvrté z nich byly čtyři frekvence transponovány o oktávu níž a jedna frekvence o dvě oktávy níž.<sup>39 40</sup>

### 2.1.3 Désintégrations, sekce II a III

Množiny (množina) frekvencí použité při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v sekci II byly vypočítány pomocí algoritmu simulujícího kruhovou modulaci (viz tabulku). Každá množina byla pravděpodobně vypočítána z dvojice jiných množin frekvencí a zahrnovala kmitočty frekvenčních složek zvuku, který by vznikl aplikací skutečné kruhové modulace na dva zvuky obsahující frekvenční složky, jejichž kmitočty by byly zahrnuty v dvojici množin, na který byl tento algoritmus aplikován.<sup>41 42</sup>

kruhová modulace
Při kruhové modulaci se násobí dva složené kmitu (okamžitá výchylka prvního složeného kmitu se vždy násobí s příslušnou okamžitou výchylkou druhého složeného kmitu). Násobí se kmitu elektrické nebo jejich digitální ekvivalenty. <sup>43</sup>

39 Tamtéž, s. 214, 215, 217.

40 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals by Anthony Cornicello*. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 56, 58.

41 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 222, 232.

42 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals by Anthony Cornicello*. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 64.

43 KIRK, R. – HUNT, A. *Digital Sound Processing for Music and Multimedia*. London, 1999. s. 131 – 132. ISBN-10: 0240515064. ISBN-13: 978-0240515069.

Množina frekvencí použitá při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu zvuků na začátku sekce III byla tvořena kmitočty frekvenčních složek zobrazených ve spektrech klarinetu, flétny a trombónu s dusítkem se základními tóny odpovídajícími kmitočtům vybraným z harmonického spektra se základním tónem F,<sup>44 45 46</sup>

Při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu ve zbytku sekce III byla použita množina tvořená frekvencemi základních tónů výše zmíněných spekter klarinetu, flétny a trombónu s dusítkem a množiny frekvencí, které z ní byly odvozeny postupnou transformací. Tato množina je transformována frekvenčním posunem v určitém počtu jednotlivých kroků. Parametry tohoto frekvenčního posunu byly vypočítány takto:

Murail nejprve určil, že nejnižší frekvence množiny, ke které bude celý posun směřovat, bude odpovídat Cis. Odečtením této frekvence od nejnižšího kmitočtu množiny frekvencí, která byla výchozím bodem posunu, Murail získal celkový rozsah posunu (61,5 Hz). Murail dále určil funkci vyjadřující závislost délky časových úseků na pořadí těchto časových úseků a dobu, která musí být výsledkem součtu těchto časových úseků. Tyto časové úseky stanovily všem frekvencím výchozí množiny a každé z množin, které měly být vypočítány posunem, společný práh, kdy nejdříve se mohou objevit, a společný práh, kdy nejpozději musí zmizet. Z těchto parametrů pak vypočítal počet kroků frekvenčního posunu (10). Vydělením rozsahu posunu počtem kroků posunu získal Murail konstantní velikost kroku (6,15 Hz).

Frekvenční posun s vypočítanými parametry byl následně aplikován na výchozí množinu frekvencí: odečtením 6,15 Hz od všech jejích frekvencí vznikla první odvozená množina frekvencí, odečtením 6,15 Hz od všech frekvencí první odvozené množiny vznikla druhá odvozená množina frekvencí atd. až do 10. odvozené množiny s nejnižší frekvencí odpovídající Cis (viz začátek předchozího odstavce).

Murail však nebyl s vypočítanými množinami zařazenými za výchozí množinu frekvencí podle pořadí, v jakém z ní byly odvozeny, spokojen. Proto pozměnil parametry frekvenčního posunu: Místo 10 vydělil rozsah posunu 25, čímž získal menší konstantní velikost kroku frekvenčního posunu (cca 2,46 Hz).

Frekvenční posun s upravenými parametry byl následně aplikován na výchozí množinu

44 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 143.

45 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 67.

46 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 223.

frekvencí: odečtením 2,46 Hz od všech jejích frekvencí vznikla první odvozená množina frekvencí, odečtením 2,46 Hz od všech frekvencí první odvozené množiny vznikla druhá odvozená množina frekvencí atd. až do 25.

Z vypočítaných 25 množin pak Murail vybral 10, se kterými byl po zařazení za výchozí množinu frekvencí podle pořadí, v jakém z ní byly odvozeny, spokojen. Těmito 11 množinám pak Murail vymezil časové úseky, jejichž délky byly pravděpodobně předtím vypočítány z funkce vyjadřující závislost délky těchto časových úseků na jejich pořadí a z doby, která měla být výsledkem součtu těchto časových úseků (viz s. 20).

Z těchto množin, typu permutace frekvencí každé z nich, stupně chaosu a z jiných parametrů nakonec počítač (zřejmě použitím *Syntad*) vypočítal parametry pro syntézu zvuků. Výsledky těchto výpočtů byly použity při vytváření instrumentálních partů.<sup>47 48 49</sup>

#### 2.1.4 Désintégrations, sekce IV – VII

O postupu kompozice sekce IV se nepodařilo najít žádné informace.

Při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v sekci V byla použita množina tvořená frekvencemi z harmonického spektra a množiny frekvencí, které z ní byly odvozeny postupnou transformací. Tato množina frekvencí z harmonického spektra byla transformována postupným “rozlad’ováním”.<sup>50 51</sup>

Množina frekvencí použitá při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu na samém začátku sekce VI byla vytvořena z frekvencí ze spektra hlubokého tónu klavíru.<sup>52</sup>

Množiny (množina), které byly základem pro zbytek sekce VI byly vypočítány pomocí algoritmu simulujícího frekvenční modulaci (viz tabulku na s. 22). Každá množina byla

---

47 Tamtéž.

48 Tamtéž, s. 224.

49 MURAIL, T. Target Practice. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 158.

50 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 232.

51 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 80.

52 MURAIL, T. *Desintegrations: Pour bande synthétisée et 17 instruments*. Paris: Editions Salabert, 1990., s. 44.

vypočítána z parametrů skutečné frekvenční modulace a zahrnovala kmitočty frekvenčních složek zvuku, který by vznikl skutečnou frekvenční modulací s těmito parametry.<sup>53 54</sup>

<b>frekvenční modulace</b>
Frekvenční modulace je v podstatě vibrato: okamžitá frekvence prvního sinusového kmitu (tzv. nosné vlny) se vždy vynásobí příslušnou okamžitou výchylkou druhého kmitu (modulačního signálu), sinusového nebo složeného. Kmity jsou elektrické, nebo se pracuje s jejich digitálními ekvivalenty. <sup>55</sup>

Při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v sekci VII byly použity permutace sedmi množin frekvencí odvozených transformací množiny tvořené frekvencemi z harmonického spektra.<sup>56 57</sup>

### **2.1.5 Désintégrations, sekce VIII**

Při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v této sekci byla použita množina frekvencí vybraných z harmonického spektra a šest množin frekvencí, které z ní byly odvozeny postupnou transformací:

Murail vypočítal frekvenci, která měla být nejnižší frekvencí první odvozené množiny, tak, že zvýšil o půltón nejnižší frekvenci výchozí množiny transformace shodnou s kmitočtem 3. frekvenční složky zobrazené v harmonickém spektru, ze kterého byly frekvence této množiny vybrány. Frekvenci, která měla být nejnižší frekvencí druhé odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o půltón nejnižší frekvenci první odvozené množiny. Frekvenci, která měla být nejnižší frekvencí třetí odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o půltón nejnižší frekvenci druhé odvozené množiny atd. až do šesté odvozené množiny frekvencí.

53 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 84.

54 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 232.

55 CHOWNING, J. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1973, vol. 21, no. 7, s. 526 – 534.

56 Tamtéž.

57 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 88.

Frekvenci, která měla být druhou nejvyšší frekvencí první odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o čtvrttón druhou nejvyšší frekvenci výchozí množiny transformace shodnou s kmitočtem 21. frekvenční složky zobrazené v harmonickém spektru, ze kterého byly frekvence této množiny vybrány. Frekvenci, která měla být druhou nejvyšší frekvencí druhé odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o čtvrttón druhou nejvyšší frekvenci první odvozené množiny. Frekvenci, která měla být druhou nejvyšší frekvencí třetí odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o čtvrttón druhou nejvyšší frekvenci druhé odvozené množiny atd. až do šesté odvozené množiny frekvencí.

Šest frekvencí, které každé odvozené množině zbývaly do počtu frekvencí výchozí množiny transformace, byly vypočítány algoritmem, který měl pravděpodobně mezi frekvencemi každé odvozené množiny zachovat poměry velikostí intervalů shodné s poměry velikostí intervalů mezi frekvencemi výchozí množiny transformace.

Množiny frekvencí byly uspořádány takto: 1., 4., 5., 2., 6., 3., 7. (1. reprezentuje výchozí množinu transformace, 2. reprezentuje první odvozenou množinu, 3. reprezentuje druhou odvozenou množinu atd.). Ambity množin frekvencí byly pak v závislosti na pořadí střídavě rozšířeny a zúženy přidáním nebo odebráním frekvencí. Dalším krokem bylo přidání či odebrání frekvencí pro zachování podobné hustoty u všech sedmi množin frekvencí.<sup>58 59 60</sup>

Při provedení *Désintégrations* syntetických zvuky v této sekci kmitají mezi dvojicí reproduktorů umístěných v blízkosti ansámblu a třetím reproduktorem umístěným v zadní části sálu – vzniká jakési prostorové vibrato. Při syntéze každého z těchto zvuků byla použita jedna z výše popsaných sedmi množin frekvencí.<sup>61</sup>

Pořadí, v jakém budou další fáze kompozičního procesu popsány v následujícím odstavci, pravděpodobně neodpovídá jejich skutečnému pořadí.<sup>62</sup>

První z výše popsaných sedmi množin frekvencí byla přiřazena frekvence prostorového

---

58 MURAIL, T. Target Practice. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 163.

59 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 231.

60 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals by Anthony Cornicello*. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 92.

61 MURAIL, T. *Desintegrations: Pour bande synthétisée et 17 instruments*. Paris: Editions Salabert, 1990., s. 7, 8.

62 MURAIL, T. Target Practice. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 163—164.

vibrata 0.2326 Hz a 1 kmit prostorového vibrata, druhé z nich frekvence 1.2534 Hz a 3 kmity, třetí frekvence 2.861 Hz a 4 kmity, čtvrté frekvence 4.8 Hz a 9 kmitů, páté frekvence 7 Hz a 3 kmity, šesté frekvence 9.4 Hz a 6 kmitů a sedmé frekvence 12 Hz a 45 kmitů. Délku časového úseku vymezeného každé z těchto množin frekvencí lze získat vynásobením odpovídající frekvence prostorového vibrata s odpovídajícím počtem kmitů prostorového vibrata.<sup>63 64</sup>

### 2.1.6 Désintégrations, sekce IX – XI

Množina frekvencí použitá při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu zvuků v sekci IX byla vypočítána pomocí algoritmu simulujícího kruhovou modulaci, který byl popsán již dříve v kapitole **2.1.3**.<sup>65</sup> Cornicello<sup>66</sup> interpretuje Murailovy poznámky k této sekci skladby tak, že dvě množiny frekvencí, ze kterých byla tato množina vypočítána, byly samy vypočítány tímto algoritmem. Murail však jinde<sup>67</sup> píše: "The modulations were calculated with the strings' spectra in mind [...]."

Parametry pro syntézu zvuku vypočítal počítač (pravděpodobně použitím programu *Syntad*) z frekvencí množiny vypočítané algoritmem simulujícím kruhovou modulaci a z následujících omezení stanovených skladatelem: frekvence budou uspořádány do sestupných linií do určité míry náhodně modifikovaných, vztahy mezi frekvencemi se budou postupně vyvíjet od neharmonických k harmonickým, hustota se bude postupně snižovat, rejstřík se bude postupně měnit z vysokého na hluboký a časové úseky vymezující jednotlivé frekvence se budou postupně prodlužovat. Výsledky výpočtů byly pak použity při vytváření

---

63 Tamtéž.

64 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 231.

65 Tamtéž, s. 222, 232.

66 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 94.

67 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 231—232.



instrumentálních partů.<sup>68</sup>

Při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v sekci X byla použita množina tvořená frekvencemi ze spektra se základním tónem  $E_1$  a množiny frekvencí, které z ní byly odvozeny postupnou transformací.

Tato transformace byla inspirována pozorováním spekter klavíru: kmitočty frekvenčních složek zobrazených ve spektru klavíru jsou vyšší než kmitočty složek zobrazených v harmonickém spektru se shodným základním tónem. Odchylka kmitočtu frekvenční složky zobrazené ve spektru klavíru od kmitočtu odpovídající složky zobrazené v harmonickém spektru závisí na jejím pořadí v rámci spektra – odchylka narůstá od první frekvenční složky (té s nejnižším kmitočtem) k poslední. Závislost kmitočtu frekvenční složky zobrazené v harmonickém spektru na jejím pořadí v rámci spektra vyjadřuje funkce  $y = a \cdot x$ , kde  $y$  je kmitočet libovolné frekvenční složky ve spektru,  $a$  je kmitočet první frekvenční složky ve spektru a  $x$  pořadí frekvenční složky v rámci spektra. Závislost kmitočtu frekvenční složky zobrazené ve spektru klavíru na jejím pořadí v rámci spektra pak vyjadřuje funkce  $y = a \cdot x^b$ , kde  $b$  je jen nepatrně větší než 1.

Frekvenci, která měla být prostřední frekvencí první odvozené množiny, vypočítal Murail tak, že zvýšil o čtvrttón prostřední frekvenci výchozí množiny transformace shodnou s kmitočtem 12. frekvenční složky zobrazené ve spektru, ze kterého byly frekvence této množiny vybrány. Frekvenci, která měla být prostřední frekvencí druhé odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o čtvrttón prostřední frekvenci první odvozené množiny. Frekvenci, která měla být prostřední frekvencí třetí odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o čtvrttón prostřední frekvenci druhé odvozené množiny atd. až do osmé odvozené množiny frekvencí.

Frekvence, která měla být nejnižší frekvencí všech osmi odvozených množin, zůstala shodná s nejnižší frekvencí výchozí množiny transformace a nejnižší frekvencí (a zároveň základním tónem  $E_1$ ) spektra, ze kterého byly frekvence této množiny vybrány.

Pro každou z osmi odvozených množin frekvencí pak byla vypočítána hodnota  $b$  dosazením nejnižší frekvence (odpovídající  $E_1$ ) za  $a$ , vypočítané prostřední frekvence za  $y$  a pořadí frekvenční složky spektra, ze kterého byly vybrány frekvence výchozí množiny transformace, s kmitočtem shodným s prostřední frekvencí výchozí množiny transformace za  $x$  ( $x = 12$ ) ve výše definovaném vzorci. Šest frekvencí, které každé odvozené množině zbývaly do počtu frekvencí výchozí množiny transformace, vypočítal počítač po dosazení

---

68 Tamtéž, s. 222, 231—232.

hodnoty vypočítané pro každou odvozenou množinu za  $b$ , nejnižší frekvence (odpovídající  $E_1$ ) za  $a$  a pořadí frekvenčních složek spektra, ze kterého pocházely frekvence výchozí množiny transformace, s kmitočty shodnými s frekvencemi výchozí množiny transformace za  $x$  ve výše definovaném vzorci.

Funkce závislosti délky časových úseků vymezených devíti vypočítaným množinám (výchozí množina + osm odvozených množin frekvencí) na jejich pořadí byla stejně jako funkce použitá při výpočtu frekvencí odvozených množin mocninná (akcelerační).<sup>69 70 71</sup>

Další parametry byly definovány tak, že výsledek popisuje Murail<sup>72</sup> takto: “[...] the transformation is very progressive: it occurs as a series of cross-fading spectral slides.”

Frekvence každé kromě jedné z množin použitých při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v sekci XI byly vybrány z harmonického spektra.

Z harmonického spektra se základním tónem  $G_1$ , pochází frekvence první množiny, z harmonického spektra se základním tónem  $G_2$ , (tj. subsubkontra  $G$ ) frekvence druhé a z harmonického spektra se základním tónem  $G_3$ , (tj. subsubsubkontra  $G$ ) frekvence třetí.

Frekvence čtvrté množiny, která byla použita při vytváření instrumentálních partů v taktu 63 sekce XI a parametrů pro syntézu odpovídajících elektronických zvuků, byly vypočítány pomocí algoritmu simulujícího frekvenční modulaci popsaného v kapitole **2.1.4**.<sup>73</sup>

Poslední (pátá) množina je tvořena kmitočty 5., 15., 25., 35. atd. frekvenční složky harmonického spektra se základním tónem  $G_4$ , (tj. subsubsubsubkontra  $G$ ).<sup>74 75</sup>

69 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 99.

70 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 229–231.

71 MURAIL, T. Target Practice. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 162–163.

72 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 231.

73 MURAIL, T. *Désintégrations: Pour bande synthétisée et 17 instruments*. Paris: Editions Salabert, 1990., s. 73.

74 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 217, 232.

75 CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals* by Anthony Cornicello. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski. s. 100–102.

## 2.2 Allégories

Skladbu *Allégories* pro šestičlenný instrumentální ansámbl a elektroniku komponoval Murail v letech 1989 – 1990 na státní objednávku a poprvé ji provedl ansámbl Musique oblique 13. března 1990 v Bruselu v rámci festivalu Ars Musica. Skladba poprvé vyšla tiskem u Éditions Salabert v Paříži.<sup>76</sup>

Elektronika u verze skladby z roku 1990 sestávala ze syntezátoru Yamaha TX816<sup>77</sup>, MIDI keyboardu, počítače MacIntosh a rozhraní MIDI. U verze z roku 1999 už zvuky nejsou syntetizovány v reálném čase na syntezátoru Yamaha TX816, ale jsou v digitální podobě uloženy v počítači a odtud při provedení přehrávány – elektronika u této nové verze tedy sestává z počítače MacIntosh, MIDI keyboardu a rozhraní MIDI.

Noty v partu keyboardu nemají nic společného s tónovými výškami, které jsou slyšet. Podle toho, kterou klávesu hráč stiskne, odešle se z keyboardu do počítače určitý kód ve formátu MIDI. “Patch” vytvořený v programu MAX (viz tabulku na s. 8) nainstalovaném na počítači pak podle toho, o jaký kód se jedná, načte nebo vygeneruje odpovídající instrukce (opět ve formátu MIDI) a odešle je syntezátoru. Syntezátor pak podle těchto instrukcí sesyntetizuje odpovídající zvukový objekt nebo prvek textury.<sup>78 79</sup>

Protože syntézu (přehrávání) jednotlivých zvukových objektů resp. prvků textury spouští hráč u keyboardu, má dirigent v *Allégories* větší svobodu ve volbě tempa, než má v *Désintégrations*, kde musí držet tempo striktně podle elektroniky.

---

76 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 135. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

77 Vintage Synth Explorer. Vintage Synth Explorer - Yamaha TX816 [online]. c1997-2009, Modified August 12, 2009 1:29:11 AM [cit. 2009-08-12] <<http://www.vintagesynth.com/yamaha/tx816.php>>.

78 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 135. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

79 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 248, 249.

MAX
<p>MAX je grafické programátorské prostředí pro vyvíjení programů pro zpracování hudebních dat v reálném čase. Uživatel v tomto prostředí programuje tak, že spojováním grafických objektů obdélníkového tvaru (“boxes”) čárami (“patch cords”) vytváří tzv. “patch”. Typický “box”, jakmile přijme data přicházející k němu přes “patch cords” připojené k jeho vstupům, podle funkce, kterou reprezentuje (např. sčítání nebo násobení), odešle určitá data přes “patch cords” připojené k jeho výstupům. Data jsou hudebního charakteru, nebo jsou alespoň určena ke kontrole hudebního procesu. Původní verzi tohoto softwaru vytvořil Miller Puckette v 80. letech v IRCAM, v současnosti nové (komerční) verze tohoto softwaru vyvíjí společnost Cycling’74.<sup>80 81</sup></p>

Přestože syntezátor Yamaha TX816 umožňuje syntézu na principu frekvenční modulace, jsou touto technikou syntetizovány pouze některé zvuky na začátku skladby:

Murail často upozorňuje na to, že akustické vlastnosti bicích nástrojů nejsou přesně standardizovány a že proto nemá kontrolu nad tím, jak budou znít bicí nástroje použité při konkrétním provedení skladby.<sup>82 83 84</sup> Pro začátek *Allégories* proto doplnil zvuk skutečného tam-tamu syntetickým zvukem, jehož parametry odpovídaly jeho představě. Tento syntetický zvuk, který má charakteristiky barevného šumu, byl vytvořen frekvenční modulací (viz tabulku na s. 22) čtyř sinusových tónů zároveň. Frekvence použité při vytváření instrumentálních partů pro začátek *Allégories* byly vybrány z množiny frekvencí vypočítané z parametrů pro syntézu tohoto zvuku pravděpodobně algoritmem simulujícím frekvenční modulaci, který byl popsán již dříve v kapitole **2.1.4**.<sup>85 86</sup>

80 SELEBORG, C. *Interaction temps-réel/temps différé: Elaboration d’un modèle formel de Max et implémentation d’une bibliothèque OSC pour OpenMusic*. Mémoire de stage de DEA ATIAM année 2003–2004. Paris, 2004. Sous la direction de M. Carlos Agon. s. 9.

81 PUCKETTE, M. Combining Event and Signal Processing in the MAX Graphical Programming Environment. *Computer Music Journal*, vol. 15, no. 3, s. 68, 69.

82 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 250.

83 MURAIL, T. The Revolution of Complex Sounds. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 132.

84 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 202–203.

85 SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 16.

86 Např. MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3,

Všechny ostatní zvuky jsou vytvářeny aditivní syntézou: syntezátor emituje sinusové kmity, jejichž parametry ovládá počítač.<sup>87 88</sup>

Mnohé syntetické zvuky *Allégories* se podobají zvukům kovových bicích nástrojů.<sup>89</sup> Jiným typem syntetických zvuků, které lze ve skladbě slyšet, nazývá Murail “oblaky zvuků” (“clouds of sounds”, “clouds of high sounds”, “clouds of low sounds”). Parametry pro syntézu každého z těchto “oblaků” vypočítal (pravděpodobně) počítač do určité míry náhodným (míra chaosu byla zřejmě definována uživatelem) uspořádáním frekvencí vybraných ze spektra určitého zvuku (srov. kapitulu 2.1.6).<sup>90 91</sup>

Syntetické zvuky někdy vytváří echa nebo pre-echa instrumentálních zvuků, přidávají jim formanty nebo postupně zdvojují jednotlivé jejich frekvenční složky. Při výpočtu parametrů pro syntézu každého z těchto zvuků byly použity frekvence vybrané ze spektra zvuku nástroje, který každý z těchto syntetických zvuků doplňuje.<sup>92</sup>

Pro výpočty množin frekvencí použitých při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu Murail používal vlastní program, který si napsal pro malý osobní počítač, který měl doma. Murail<sup>93</sup> tento program charakterizuje jako

“[...] quite a sophisticated program [...] that worked very well. I had a MIDI output, and I could bring up music staves on the screen. I used a light pen instead of a mouse, which enabled me to draw notation onto the screen. In terms of interactivity, it was superior to Patchwork, but in general, it was much more limited than Patchwork. This is what I used for most of the 1980s. Then a few people at IRCAM began to work on a program called Esquisse (Laurson and Duthen 1990). This was not an official project at IRCAM. It was initiated by Jean-Baptiste Barrière and composers Magnus Lindberg and Marc-André Dalbavie. Then, Patchwork was proposed by Mikael Laurson around 1990. I remember that I wrote *Allegories*

s. 250.

87 MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 250.

88 MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 135. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.

89 Např. MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 252.

90 Tamtéž, s. 250.

91 Tamtéž, s. 252.

92 Tamtéž, s. 252—253.

93 SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 16.

in my old system in 1989. I switched to Patchwork over the next two or three years.”

Tento program má Murail pravděpodobně na mysli, když jinde<sup>94</sup> píše:

“The newer microcomputers can define graphic entities that have been attractively named ‘sprites’, which can move around the screen: a good thing for us. Once the result of a frequency modulation calculation, or any other, has been calculated, the screen will fill up with these sprites in the form of musical notes so that we can immediately appreciate the sonic result of our investigations.”

Murail původně uvažoval i o dalším využití elektroniky v *Allégories*:

"[...] you could think of changing the timbre of the piece according to the room acoustics. I had thought of this with Allegories, but I decided it was too dangerous. That would take too much time in the rehearsal and in the concert hall itself, so I didn't think that it would be realistic. Nonetheless, it would be an interesting use of live electronics."<sup>95</sup>

To, že Murail uvažoval o elektronické modifikaci parametrů frekvenčních složek zvuku při provedení skladby, je pochopitelné, když víme, jak je zvuk v obvyklých koncertních situacích prostorem zkreslován (viz s. 40 - 41).

---

94 MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 144.

95 SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 14.

### 2.2.1 postup kompozice

Prvním kompozičním problémem, který Murail řešil, bylo nalezení vhodného zvukového objektu pro začátek skladby:

“I needed a very special, malleable object: one that was susceptible to metamorphosis, but also one that was sufficiently distinctive that it could be easily recognized—yet not so distinctive that it could not undergo extensive transformations. It is helpful if such an object is simple and striking, but it is not necessary—on the contrary—that it be complex or even very interesting. A perfect example is the initial cell of Beethoven’s Fifth Symphony: a not very sophisticated melodic fragment. However, this simple idea allows for many subsequent transformations. Without wanting to inflate the analogy or compare my piece to Beethoven’s, this is a bit like what happens here.”<sup>96</sup>

Z počátečního zvukového objektu bylo různými transformacemi odvozeno velké množství nových objektů.<sup>97</sup> Murail<sup>98</sup> dále popisuje kompoziční proces takto:

“My initial plan, for example, contained five parts; however, in the end only four remained. What is now section l, which is comprised of many ‘clouds’ of sounds, was initially supposed to occur just after section c. However, it seemed to me that section l was too elaborate for that particular moment—it would have been too close to the beginning of the piece. It is hard to explain these types of decisions in a purely rational way. Perhaps I needed to hear less distorted forms of the initial object at this early stage of the piece. On the other hand, the structure of the ‘clouds’ did function well as a sort of parenthesis; therefore, I inserted an abridged version of this future section l, which became section d. In the same way, e is a summary of the future section m. It also seemed to me necessary to have a return to the initial situation before going on to explore more distorted and distant regions (section g, which evokes the beginning of section a).”

---

96 Např. MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 255—256.

97 Tamtéž, s. 256—258.

98 Tamtéž, s. 260—261.

Další kompoziční problém popisuje Murail<sup>99</sup> takto: “Herein lies one of my primary compositional concerns: finding the harmonic progression that best represents the musical image that I have in mind.” Jako příklad řešení tohoto problému uvádí Murail<sup>100</sup> množiny frekvencí, které použil při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu pro úsek od začátku sekce b do začátku sekce c první části *Allégories*: “In the same way that the three sections in part I are smoothly connected gesturally, there is a single (smooth) harmonic progression that unifies them as well.”

Při vytváření instrumentálních partů a parametrů pro syntézu v tomto úseku byla použita množina tvořená kmitočty 3., 5., 7., 9., 11., 13., 15., 18., 20. a 29. frekvenční složky zobrazené v harmonickém spektru a několik dalších množin frekvencí, které z ní byly odvozeny postupnou transformací:

Murail vypočítal frekvenci, která měla být nejnižší frekvencí první odvozené množiny, tak, že zvýšil o 4,5 Hz nejnižší frekvenci výchozí množiny transformace shodnou s kmitočtem 3. frekvenční složky zobrazené v harmonickém spektru, ze kterého byly frekvence této množiny vybrány. Frekvenci, která měla být nejnižší frekvencí druhé odvozené množiny, vypočítal tak, že zvýšil o 0,8 Hz nejnižší frekvenci první odvozené množiny atd. Funkce vyjadřující závislost nejnižší frekvence množiny na pořadí odvození množiny má zig-zag průběh.

Frekvenci, která měla být nejvyšší frekvencí první odvozené množiny, vypočítal tak, že snížil o 62 Hz nejvyšší frekvenci výchozí množiny transformace shodnou s kmitočtem 29. frekvenční složky zobrazené v harmonickém spektru, ze kterého byly frekvence této množiny vybrány. Frekvenci, která měla být nejvyšší frekvencí druhé odvozené množiny, vypočítal tak, že snížil o 90 Hz nejvyšší frekvenci první odvozené množiny atd. Funkce vyjadřující závislost nejvyšší frekvence množiny na pořadí odvození množiny má opět zig-zag průběh.

Osm frekvencí, které každé odvozené množině zbývaly do počtu frekvencí výchozí množiny transformace, byly vypočítány (pravděpodobně počítačem<sup>101</sup>) pomocí algoritmu, který měl pravděpodobně mezi frekvencemi každé odvozené množiny zachovat poměry velikostí intervalů shodné s poměry velikostí intervalů mezi frekvencemi výchozí množiny transformace.

---

99 Tamtéž, s. 260.

100 Tamtéž, s. 261.

101 SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 16.



Množiny frekvencí byly uspořádány od poslední odvozené k výchozí množině transformace. Tyto množiny byly dále upraveny tak, že počet jejich prvků se měnil v závislosti na pořadí těchto množin. I některé z dalších parametrů, které byly základem pro vytvoření instrumentálních partů a syntetických zvuků, se měnily v závislosti na pořadí množiny frekvencí, se kterou byly spojeny.<sup>102</sup>

---

<sup>102</sup> Např. MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992.  
Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 261.

### **3. Otázky vyvstávající ze zrekonstruovaných kompozičních procesů**

#### **3.1 obecný model pro zrekonstruované kompoziční procesy**

Obecný model, který lze pozorovat na kompozičních procesech částečně zrekonstruovaných v následující kapitole, vypadá takto:

Ze spektra zvuku, které se rozhodne použít při kompozici skladby, nebo jeho transpozice Murail vybere množinu frekvencí, která zahrnuje kmitočty všech nebo jen vybraných frekvenčních složek zobrazených v tomto spektru. Z této množiny Murail eventuálně transformací odvodí další množinu frekvencí, ze které případně další transformací odvodí další množinu frekvencí atd. Tyto množiny jsou někdy rozšířeny o další frekvence nebo z nich mohou být některé frekvence eliminovány.

Alternativně může být množina frekvencí výsledkem výpočtu algoritmem simulujícím frekvenční nebo kruhovou modulaci.

Každé množině je vymezen časový úsek stanovující všem frekvencím v ní zahrnutým společný práh, kdy nejdříve se mohou objevit, a společný práh, kdy nejpozději musí zmizet. Časové úseky vymezené jednotlivým množinám na sebe bezprostředně navazují.

Z frekvencí z jednotlivých množin a z dalších Murailem definovaných parametrů jsou pak vytvořeny parametry pro syntézu zvuků a/nebo instrumentální party (po aproximaci každé z vybraných frekvencí na nejbližší tónovou výšku osminotónového, čtvrttónového nebo půltónového systému).

## 3.2 otázka vztahu mezi sluchovým vjemem skladby a vjemem zvuku, jehož spektrem byla inspirována

### 3.2.1 motivace otázky

Uvědomme si nyní, že tónový zvuk závisí na počtu frekvenčních složek, jejich relativních kmitočtech, proměně počtu frekvenčních složek a jejich kmitočtů v čase, absolutních kmitočtech frekvenčních složek s nejvyššími amplitudami (rozpoznání tónu může být znesnadněno zachováním relativních amplitud při transpozici zvuku), relativních amplitudách frekvenčních složek a na proměně těchto relativních amplitud v čase. Murail ve výše částečně zrekonstruovaných kompozičních procesech vybíral ze spekter zvuku nebo jejich transpozic pouze frekvence (a to zpravidla ne všechny) a hodnoty ostatních parametrů (amplitudy resp. dynamika, přesné časové uspořádání frekvencí uvnitř vymezených časových úseků) byly produktem jeho kreativity. Navíc Murail kmitočty frekvenčních složek (sinusových kmitů) volně zaměňoval za tónové výšky zvuků, které samy obsahují velké množství frekvenčních složek (jelikož množiny frekvencí vybraných ze spekter zvuků byly použity jak při vytváření parametrů pro syntézu zvuků, tak při vytváření instrumentálních partů). Vychází tedy otázka, do jaké míry je člověk schopen po zaznění některé pasáže *Désintégrations* nebo *Allégories*, v průběhu které zaznívají zvuky, při jejichž syntéze byla použita množina frekvencí vybraných ze spektra nebo jeho transpozice, a instrumentalisté hrají z partů, při jejichž vytváření byla použita ta samá množina frekvencí, identifikovat zvuk, jehož analýza poskytla výsledek zobrazený v tomto spektru.

Zajímavým faktem je, že aby tato otázka vyvstala, nemusíme vědět téměř nic o procesech vzniku Murailových skladeb. Stačí vědět, že Murail pracoval se spektry zvuků (“piano spectrum”<sup>103</sup>, “trombone's spectrum”<sup>104</sup>, “the spectrum of three of the low sounds”<sup>105</sup>). S analýzou, jejíž výsledek se zobrazuje ve formě spektra, je totiž spojen určitý “filozofický”<sup>106</sup> problém – to, co obvykle nazýváme “spektrům zvuku”, totiž nikdy není spektrem zvuku.

---

103 Např. MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 228.

104 Tamtéž, s. 229.

105 Tamtéž, s. 240.

106 Tento přívlastek použil prof. Ing. Václav Syrový, CSc. při soukromé konzultaci.

Z definice spektra zvuku (viz kapitolu 2.1.1) vyplývá, že k jeho vygenerování potřebujeme znát parametry (kmitočty, amplitudy, případně fáze) jednotlivých frekvenčních složek zkoumaného zvuku. Tyto parametry rozhodně nejsou ze zvuku zřejmé:

Představme si kyvadlo, na jehož konci je zavěšené další kyvadlo atd. – takto je na sobě navěšeno např. 50 kyvadel a každé z nich kmitá s určitou frekvencí, amplitudou a fází relativně ke kyvadlu, na kterém je zavěšeno (a které samo kmitá relativně ke kyvadlu, na kterém je zavěšeno atd.). Zjišťovat parametry jednotlivých frekvenčních složek zkoumaného zvuku je jako hledat parametry popisující kmit každého z kyvadel a přitom moci sledovat pouze pohyb posledního kyvadla (toho, na kterém už žádné další není zavěšeno).

Protože parametry jednotlivých frekvenčních složek zkoumaného zvuku z něj nejsou zřejmé, musíme si při jejich hledání pomoci speciálním technickým vybavením.

Hledání parametrů frekvenčních složek zvuku (obecně kmitání) se nazývá **fourierovská analýza**. Ta se dříve prováděla pomocí soustavy tzv. pásmových filtrů. Každý z filtrů soustavy byl “naladěn” na jiné úzké pásmo frekvencí tak, že dohromady pokrývaly požadovaný frekvenční rozsah. Pásmový filtr je elektronický obvod, který transformuje vstupní střídavé napětí (vycházející např. z mikrofону) na takové střídavé napětí, ve kterém je amplituda všech frekvenčních složek vstupního napětí kromě těch, které spadají do více či méně úzkého rozsahu (pásmu) frekvencí, na které je filtr “naladěn”, výrazně snížena. Proč však najednou už nemluvíme o zvuku (mechanickém kmitání), ale o střídavém napětí?

Téměř každé analýze zvuku v současnosti předchází přeměna zkoumaného zvuku na střídavé napětí použitím některého z tzv. **akustických měničů**. Jak víme, zvuk je mechanické kmitání šířící se ve formě postupného vlnění pružným prostředím. Doposud jsme popsali pouze obecný model volného tlumeného a samobuzeného kmitání bodu pružného prostředí (viz s. 15 – 16). Tyto dva modely odpovídají kmitání té části hudebního nástroje, kterou nazýváme **generátorem zvuku** (struna, jazýček, blána, deska atd.), v místě, kde na ni hráč působí silou (místo drnknutí struny, místo úderu paličkou atd.). Přestože existují akustické měniče, které dokážou na střídavé napětí přeměnit přímo toto kmitání, nahrává se zvuk nejčastěji pomocí **mikrofonů**, které na **střídavé napětí** přemění **kmitání částic vzduchu** v bodech prostoru (koncertní síně, nahrávacího studia atd.), kde jsou umístěny.

Vyvstává otázka, jaký proces vede od **kmitání bodu generátoru zvuku** ke **kmitání částic vzduchu**, které bezprostředně sousedí s akustickým měničem resp. lidským uchem. Tento proces lze popsat pomocí pěti modelů navazujících na předchozí modely: první z těchto modelů objasní poslední nedefinovaný pojem z definice zvuku (**postupné vlnění**), pátý, který

vychází z prvního, druhého a třetího, vysvětlí, proč Murail u Allégories uvažoval o přizpůsobení tónu konkrétnímu prostoru, ve kterém se skladba bude provádět (viz s. 30), a konečně čtvrtý z nich, který je kombinací prvního, druhého a třetího, nám pomůže pochopit, proč to, co obvykle nazýváme “spektrém zvuku”, nikdy není spektrém zvuku.

Pro účely demonstrace prvních dvou modelů rozvineme příklad pohybu struny kytary v místě drnknutí a příklad pohybu struny houslí v místě smyku při tahu smyčcem (viz s. 14 – 15):

Kytarista vychýlí strunu z rovnovážné polohy a následně ji pustí. Struna se kvůli své pružnosti začne v místě drnknutí pohybovat zpět do počáteční polohy. Tento pohyb se odtud šíří na obě strany. Tím vznikají na struně dva záhyby, které postupují každý na opačnou stranu od místa drnknutí. Na koncích struny se záhyby odrazí a v převrácené formě se vrací zpět – struna míjí vlivem setrvačnosti rovnovážnou polohu. Po tom, co oba záhyby dvakrát proběhnou celou strunou a znovu se setkají, nabývá struna dočasně formy, kterou měla v momentu, kdy ji kytarista pustil. V tomto okamžiku má za sebou každý bod struny jeden celý kmit.

Pohyb struny houslí jako celku při tahu smyčcem vypadá takto:

Struna se nejprve přichytí na žíně smyčce a je jím následně konstantní rychlostí vychylována z rovnovážné polohy, čímž na ní v místě kontaktu se smyčcem vzniká ostrý zlom, který ji dělí na dvě úsečky. Jakmile je tření, které drží strunu přichycenou na žíních, překonáno pružností struny, její část ležící pod smyčcem se uvolní a vymrští zpět směrem do rovnovážné polohy. Tento pohyb se od smyčce šíří ke kobylce opět ve formě ostrého zlomu. Na kobylce se zlom odrazí a v převrácené formě vrací zpět – struna míjí vlivem setrvačnosti rovnovážnou polohu. Jakmile zlom přicházející od kobylky proběhne pod smyčcem, struna se na něj znovu přichytí a v místě dotyku je jím konstantní rychlostí vychylována, zatímco zlom postupuje dále směrem k hmatníku. Zde se zlom opět odrazí a v převrácené formě vrací zpět – struna opět míjí vlivem setrvačnosti rovnovážnou polohu. Jakmile zlom přicházející tentokrát od hmatníku proběhne pod smyčcem, část struny ležící pod smyčcem se znovu uvolní a vymrští směrem do rovnovážné polohy. V tomto okamžiku má za sebou každý bod struny jeden celý kmit. V průběhu kmitu obíhá zlom po dvou parabolických drahách (opisuje parabolu střídavě na jedné a druhé straně od rovnovážné polohy).

Tyto dva příklady vysvětlíme dvěma modely: obecným modelem **postupného vlnění** a obecným modelem **stojatého vlnění** pružného prostředí:

Jak již bylo řečeno, body pružných prostředí, se kterými se obvykle setkáváme,

vykonávají více kmitů zároveň. Každá z frekvenčních složek kmitání bodu pružného prostředí (místo drnkutí na kytarové struně, místo smyku na struně houslí atd.) se šíří na další body prostředí formou tzv. postupného vlnění.

Postupné vlnění (poslední neobjasněný pojem z definice zvuku) šířící se v jedné dimenzi lze pozorovat na provaze, jehož oba konce jsou volné, když jedním koncem prudce trhneme nahoru a dolů, postupné vlnění šířící se ve dvou dimenzích lze pozorovat na vodní hladině, když na ni dopadne např. kámen. Postupnému vlnění šířícímu se ve třech dimenzích se budeme věnovat v souvislosti s třetím modelem.

Obecně postupné vlnění vypadá tak, že kmitající bod pružného prostředí působí silou na sousední body tohoto pružného prostředí, protože je s nimi spojen pružnou vazbou. Tyto sousední body se s určitým zpožděním také rozkmitají a působí silou na další body, se kterými jsou spojeny pružnou vazbou. Tyto další body se s určitým zpožděním také rozkmitají atd.

Pokud je pružné prostředí prostorově ohraničené (např. struna je ohraničena kobylkou a pražcem resp. prstem hráče), postupné vlnění narazí na rozhraní s jiným prostředím (kobyłka u kytary a houslí, pražec u kytary a pražec nebo prst hráče u houslí), odrazí se a skládá s vlněním postupujícím v původním směru.

Pokud kmitání bodu pružného prostředí obsahuje pouze jednu frekvenční složku, chová se pružné prostředí dále takto:

Odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím v původním směru tak, že některé body prostředí zůstávají po celou dobu v rovnovážné poloze (v těchto bodech jsou tzv. uzly), body uprostřed úseků (u strun nebo tyčí) nebo ploch (u blan nebo desek) ohraničených uzly kmitají s amplitudou, která je rovna součtu amplitud obou vln (v těchto bodech jsou tzv. kmitny), a ostatní body těchto úseků nebo ploch kmitají s amplitudou menší. Body v rámci jednoho úseku nebo plochy kmitají tak, že se vždy buď všechny nachází v rovnovážné poloze nebo na stejnou stranu od ní. Body dvou sousedních úseků nebo ploch se vždy nachází buď v rovnovážné poloze nebo na opačnou stranu od ní. Všechny body prostředí dosahují maximální výchylky současně. Tento jev se nazývá stojaté vlnění. Přesné prostorové rozložení uzlů a kmiten (tzv. mód kmitání prostředí) závisí na kmitočtu frekvenční složky.

Pokud kmitání bodu pružného prostředí obsahuje více než jednu frekvenční složku (což je, jak už víme, téměř vždy), kmitá prostředí ve více módech zároveň (tzn. v každém momentu je okamžitá výchylka každého bodu prostředí rovna součtu okamžité výchylky, kterou by v tom samém momentu měl ten samý bod, obsahovalo-li by kmitání bodu, ze kterého se šíří postupné vlnění, pouze frekvenční složku  $f_1$ , s okamžitou výchylkou, kterou by

v tom samém momentu měl ten samý bod, obsahovalo-li by kmitání bodu, ze kterého se šíří postupné vlnění, pouze frekvenční složku  $f_2$  atd.). Právě výše popsany pohyb struny kytary jako celku po drnknutí a pohyb struny houslí jako celku při tahu smyčcem vznikají skládáním velkého množství módů kmitání.

Pro účely demonstrace třetího modelu dále rozvineme příklad pohybu struny kytary jako celku po drnknutí resp. pohybu struny houslí jako celku při tahu smyčcem a pohybu jazýčku varhanní píšťaly (viz s. 15 – 16, 37):

Kmitající struna kytary nebo houslí působí na kobytku silou, jejíž směr odpovídá směru okamžité výchylky struny (tedy se nutně periodicky mění). Tato síla se přenáší na oblast ozvučné desky, kde je kobyčka upevněna.

Pohyb jazýčku varhanní píšťaly vypadá takto:

Kmitající jazýček reguluje přívod vzduchu do násady. Takto přerušovaný proud vzduchu působí silou (a tím samozřejmě i tlakem) na částice vzduchu v dolní části násady.

Na těchto dvou příkladech můžeme definovat obecný model tzv. **nuceného kmitání** bodu pružného prostředí, který, jak bylo řečeno, nám pomůže správně zhodnotit, co vypovídá spektrum zvuku o zvuku samotném:

Síla, jejíž průběh je determinován kmitáním bodu libovolného pružného prostředí prostředí (síla, kterou působí struna kytary nebo houslí přes kobytku na ozvučnou desku, nebo síla, kterou působí proud vzduchu regulovaný jazýčkem varhanní píšťaly na vzduchový sloupec v násadě atd.), vychýlí z rovnovážné polohy bod pružného prostředí (např. oblast ozvučné desky kytary nebo houslí, kde je upevněna kobyčka) a dále na něj působí. Jakmile tato síla přestane působit, přejde tento bod do volného tlumeného kmitání (viz s. 15). Při přechodu z klidového stavu do stabilního kmitání (při tzv. zakmitávání) a při každé změně průběhu této síly vykonává tento bod kmity s vlastními frekvencemi pružného prostředí, jehož je součástí (viz s. 17), i kmitočty frekvenčních složek této síly zároveň. Po stabilizaci kmitá tento bod s kmitočty frekvenčních složek této síly (jedná se o tzv. nucené kmitání). Reálná tělesa jsou však zpravidla tzv. nelineární systémy, a tak kmitání tohoto bodu kromě frekvenčních složek s kmitočty odpovídajícími kmitočtům frekvenčních složek této síly obsahuje i takové složky, jejichž kmitočty jsou celými násobky kmitočtů frekvenčních složek této síly nebo absolutními hodnotami součtů a rozdílů těchto násobků.

Amplitudy frekvenčních složek kmitání tohoto bodu závisí na vztahu mezi kmitočty frekvenčních složek této síly a vlastními frekvencemi pružného prostředí, jehož je tento bod součástí. Pro zjednodušení předpokládejme, že tato síla má jen jednu frekvenční složku s

frekvencí  $f_1$  a amplitudou  $A_1$  a toto pružné prostředí má pouze jednu vlastní frekvenci  $f_2$ . (Pod tímto bodem si teď představme dítě sedící na houpačce, pod touto silou sílu, se kterou dítě pohybuje nohama střídavě dopředu a dozadu, aby se rozhoupalo, pod  $f_1$  frekvenci tohoto pohybu a pod  $f_2$  frekvenci, se kterou se dítě může houpat a která závisí mj. na hmotnosti dítěte.) Je-li  $f_1$  výrazně nižší než  $f_2$ , kmitá tento bod s amplitudou  $A=A_1$ . Se zvyšováním frekvence  $f_1$  amplituda  $A$  roste a při  $f_1=f_2$  dosahuje maxima – vzniká tzv. rezonance. Stoupá-li  $f_1$  nad  $f_2$ , klesá amplituda  $A$  rychle k nule.

Pro účely demonstrace čtvrtého modelu dále rozvineme příklad pohybu ozvučné desky kytary resp. houslí v místě uchycení kobylky a pohybu částic vzduchu ve spodní části násady varhanní píšťaly.

Kmitání vyvolané periodickou silou, kterou struna působí na kobylku, se šíří od místa pod kobylkou po celé ozvučné desce (a případně dalších rezonátorech, např. dutině uvnitř korpusu) ve formě postupného vlnění. Toto vlnění se odráží od okrajů ozvučné desky, skládá se s vlněním postupujícím v původním směru a vzniká vlnění stojaté. Kmitající korpus zpětně ovlivňuje kmitání struny, což může mít nežádoucí účinky na kvalitu tónu (např. tzv. vlčí tóny u mnoha smyčcových nástrojů, zvláště violoncell).

Pohyb jazýčku varhanní píšťaly vypadá takto:

Tlakové impulsy, které vyvolává proud vzduchu regulovaný kmitajícím jazýčkem, postupují od spodního konce vzduchového sloupce v násadě k jeho hornímu konci, kde se odráží a cestou zpět se skládají s dalšími zdola přicházejícími impulsy, čímž uvnitř násady vzniká stojaté vlnění. Kmitající vzduchový sloupec pak do určité míry sám reguluje přívod vzduchu do násady a tím ovlivňuje i kmitání jazýčku.

Tyto dva příklady odpovídají kombinaci modelu **nuceného kmitání** s modelem **postupného a stojatého vlnění** (viz s. 37 – 40).

Pátý model též vychází z výše popsaných modelů:

Tělesa umístěná v **prostoru**, ve kterých se podle prvního a druhého modelu ustavilo stojaté vlnění, podle modelu nuceného kmitání rozkmitávají částice vzduchu v jejich bezprostředním okolí, odkud se kmitání šíří všemi směry podle modelu postupného vlnění. Částice vzduchu jsou obvykle rozkmitávány rezonátorem hudebního nástroje (např. horní deska, luby, spodní deska a prostor uvnitř korpusu u strunných nástrojů, vzduchový sloupec u dechových nástrojů, válcovité, polokulovité, nebo hranolovité těleso u bicích nástrojů) spíše než přímo generátorem (např. struna nebo jazýček), výjimkou jsou některé idiofony, např. gong nebo zvon. Zvuk (mechanické kmitání šířící se pružným prostředím ve formě



postupného vlnění) se následně mnohonásobně odráží od stěn a jiných překážek do různých směrů a odražená vlnění se skládají s jinými odraženými vlnami nebo s těmi, které se šíří od kmitajících těles. Vlny se také kolem překážek ohýbají. Po každém kontaktu s překážkou je však amplituda vlny nižší, překážky část energie, která se při postupném vlnění přenáší, pohltí neboli absorbují. Zvuk pohlcují zejména látky s malou pružností (textilie) a tělesa s členitým povrchem nebo s dutinami. Vlny s různými vlnovými délkami ztrácí při kontaktu s tou samou překážkou různé množství energie. Vlnová délka dané vlny je u postupného vlnění definována jako nejmenší vzdálenost dvou bodů, které kmitají se stejnou fází, a v daném prostředí závisí na frekvenci kmitání, které se formou dané vlny šíří. Některé frekvenční složky se tedy z kmitání částic vzduchu v prostoru vytratí rychleji než jiné (!).

Speciálním případem prostoru je tzv. bezdozvuková místnost (jinak také bezodrazová místnost nebo mrtvá komora). Její stěny jsou uzpůsobeny tak, aby zvuk co nejvíce pohlcovaly (a tím zároveň co nejméně odrážely). Protože od takových stěn se téměř žádné vlnění neodráží, prochází částicemi vzduchu v mrtvé komoře převážně jen vlny postupující přímo od kmitajících těles (podobná situace nastává na volném prostranství). Kmitání částic vzduchu v mrtvé komoře je tedy složeno převážně jen z frekvenčních složek kmitání těles. Proto se mrtvá komora dobře hodí pro měření akustických vlastností těchto těles (mikrofonů, reproduktorů a hudebních nástrojů).

Nyní se můžeme vrátit k otázce **nahrávání zvuku v prostoru**. Pro pochopení proč to, co obvykle nazýváme “spektrém zvuku”, nikdy není spektrém zvuku, je zásadní fakt, že kmitání součástek akustického měniče je vyvoláno kmitajícími částicemi vzduchu v jejich bezprostřední blízkosti podle čtvrtého z předchozích modelů (kombinace modelu **nuceného kmitání** s modelem **postupného a stojatého vlnění** – viz s. 40), takže frekvenční složky střídavého napětí nemusí odpovídat frekvenčním složkám původního zvuku – dochází ke **zkreslení zvuku**. Zkreslení je malé např. u tzv. kondenzátorových mikrofonů.

Jak bylo výše řečeno, **fourierovská analýza** se dříve prováděla pomocí soustavy pásmových filtrů. V současnosti se však fourierovská analýza obvykle provádí tak, že parametry frekvenčních složek zkoumaného zvuku vypočítává počítač pomocí algoritmu **FFT** (Fast Fourier Transform). Moderní počítače však dokáží pracovat pouze s daty v digitální podobě. Pokud má tedy fourierovskou analýzu zvuku provádět počítač, je nutné nejen převést zvuk na střídavé napětí, ale je navíc potřeba toto **střídavé napětí** převést do **digitální podoby**. Tu lze získat tak, že střídavé napětí přicházející z mikrofonu se nejdříve zesílí a pak pošle do tzv. ADC (Analog-to-Digital Converter). Toto zařízení v pravidelných časových odstupech

měří hodnoty napětí, převádí je do binárního kódu a ukládá (uložené hodnoty se nazývají vzorky). V závislosti na vztahu mezi parametry frekvenčních složek střídavého napětí a parametry ADC dochází v různé míře k různým formám **zkreslení**.

Jak jsme viděli v předchozích kapitolách, některé zvuky odpovídají modelu volného tlumeného kmitání (zvuk drnknuté struny, zvuk blány bubnu atd.), jiné odpovídají modelu nuceného kmitání (horní deska, luby, spodní deska a prostor uvnitř korpusu u strunných nástrojů, vzduchový sloupec u dechových nástrojů atd.). Viděli jsme, že v obou případech procházejí parametry frekvenčních složek zvuků v průběhu jejich trvání změnami (viz s. 15, 39 – 40). To platí i pro zvuky odpovídající modelu samobuzeného kmitání (viz s. 15 – 16). Např. u struny houslí dochází ke změnám parametrů frekvenčních složek tím, že houslista v průběhu smyku nikdy nedokáže držet smyčec stále ve stejné poloze na struně. Je možné ze **spektra zvuku** vyčíst tyto změny parametrů?

Parametry frekvenčních složek se vždy vypočítávají z určitého počtu vzorků, který odpovídá určitému časovému úseku analyzovaného zvuku. Výsledkem jsou parametry všech frekvenčních složek, které se ve zvuku v průběhu tohoto časového úseku vyskytly (pokud zanedbáme zkreslení při převodu zvuku na střídavé napětí a při následné digitalizaci). Z výsledku nelze vyčíst, kdy přesně v průběhu tohoto časového úseku se která frekvenční složka objevila, jak se její parametry v průběhu jejího trvání proměňovaly a kdy se ze zvuku vytratila. Pokud tedy máme k dispozici pouze parametry vypočítané z vzorků odpovídajících jednomu kratšímu či delšímu úseku zkoumaného zvuku, není možné ze spektra vyčíst **změny parametrů frekvenčních složek zvuku v čase**. Pro získání těchto informací je nutné digitální záznam zvuku rozdělit na segmenty o určitém (malém) počtu vzorků, provést výpočet pro každý z těchto segmentů zvlášť a výsledná spektra porovnat. Čím kratšímu časovému úseku zkoumaného zvuku však segment odpovídá, tím nepřesnější bude informace o kmitočtech jednotlivých frekvenčních složek – kmitočty budou lokalizovány do frekvenčních pásem, která budou širší, než kdyby se výpočet prováděl pro počet vzorků odpovídající delšímu časovému úseku zkoumaného zvuku. Výsledky série výpočtů lze vizualizovat ve formě tzv. sonogramu – zobrazení vyjadřující závislost amplitudy na frekvenci jako funkci času.

**Fourierovská analýza** sama je navíc zatížena následujícím problémem: pokud se **zvuk obsahující pouze jednu frekvenční složku** převede do digitální podoby tak, že poslední ze vzorků, pro které se provádí výpočet, se shoduje s prvním z nich, vykazuje **spektrum** tohoto zvuku jedinou **svislou čáru** (pokud zanedbáme zkreslení při převodu zvuku na střídavé napětí a při následné digitalizaci). Neshodují-li se však oba vzorky, vykazuje spektrum zvuku **rušivé**

**kontinuum** po celé svojí šířce. Analýza záznamu reálného zvuku odpovídá prakticky vždy druhému případu.

Tento problém se řeší tak, že na digitální záznam zvuku se aplikuje tzv. **časové okno**, které má určitý tvar a délku:

Počet vzorků obsažený v každém ze segmentů, na které se rozdělí digitální záznam zvuku, určuje délku časového okna. První a poslední vzorek z každého segmentu se vynásobí nulou, prostřední vzorek jedničkou a ostatní se vynásobí hodnotami vypočítanými interpolací mezi těmito vzorky – tvar této interpolace určuje tvar časového okna. Po této úpravě se pro každý ze segmentů provede výpočet.

Ani tak však **spektrum zvuku obsahujícího jednu frekvenční složku** nevykazuje jednu **svislou čáru**, ale **špici rozšiřující se směrem dolů**. To, jak moc se špice směrem dolů rozšiřuje, závisí na délce a tvaru časového okna. Čím je časové okno kratší, tím je špice širší a při pohledu na spektrum zvuku, obsahujícího více než jednu frekvenční složku, lze od sebe hůře oddělit jednotlivé frekvenční složky. Z různých tvarů, které se používají, je rozšíření špice zvláště malé, vynásobí-li se vzorky tzv. Gaussovou křivkou.

Vidíme, že výsledek **fourierovské analýzy** zobrazený ve **spektru** se nikdy úplně neshoduje se **skutečnými parametry frekvenčních složek analyzovaného zvuku** a že míra **zkreslení** závisí na velkém množství faktorů: akustických vlastnostech prostoru, ve kterém se zvuk nahrával, charakteristikách mikrofonu (mikrofonů), pomocí kterého se zvuk nahrával, parametrech ADC, pomocí kterého se zvuk transformoval do digitální podoby, délkám časových úseků zvuku, kterým odpovídaly segmenty vzorků, ze kterých se vypočítávaly parametry frekvenčních složek, frekvenčním rozlišení a případně tvaru časového okénka použitého při analýze.

### 3.2.2 experiment

Experiment, který by nám umožnil najít pravdivou odpověď na výše zformulovanou otázku, by mohl vypadat následovně:

Subjekt by měl za úkol rozhodnout, ve které ze dvou dvojic zvuků, které uslyší, jsou si zvuky podobnější. První zvuk v každé dvojici by byla pasáž z *Désintégrations* nebo *Allégories*, v průběhu které zaznívají zvuky, při jejichž syntéze byla použita množina frekvencí vybraných ze spektra zvuku, a instrumentalisté hrají z partů, při jejichž vytváření byla použita ta samá množina frekvencí. Druhý zvuk v jedné z dvojic by byl zvuk, jehož fourierovská analýza dala výsledek zobrazený v tomto spektru. Druhý zvuk v druhé z dvojic by se od druhého zvuku v první z dvojic určitým způsobem lišil.

### **3.3 otázka vztahu mezi vjemem souzvuku, jehož tónové výšky jsou odvozeny z množiny frekvencí, a vjemem zvuku, jehož frekvenční složky mají kmitočty z té samé množiny**

#### **3.3.1 motivace otázky**

Připomeňme si znovu, že Murail ve výše částečně zrekonstruovaných kompozičních procesech frekvence množin uvnitř vymezených časových úseků uspořádával velmi volně a zejména že kmitočty frekvenčních složek (sinusových kmitů) volně zaměňoval za tónové výšky zvuků, které samy obsahují velké množství frekvenčních složek. V této souvislosti stojí za to připomenout si proces od chvíle, kdy instrumentalista zahraje notu vygenerovanou z frekvence vybrané ze spektra nějakého zvuku, do chvíle, kdy kmitající částice vzduchu začnou působit na ušní boltec posluchače (viz s. 36 – 41).

Představme si množinu frekvencí ( $M$ ) a dva zvuky ( $A$  a  $B$ ). Množina  $M$  je tvořena kmitočty frekvenčních složek zvuku  $A$ . Zvuk  $B$  je složen ze zvuků, které se samy skládají z minimálně dvou frekvenčních složek. Každý z těchto zvuků, pokud zní samostatně, vyvolává vjem určité tónové výšky – stejný, jaký by vyvolal sinusový tón s kmitočtem z množiny  $M$ . Každé frekvenci z množiny  $M$  odpovídá tónová výška jednoho ze zvuků, ze kterých se skládá zvuk  $B$ . Z předchozího odstavce vyvstává další otázka, totiž za jakých podmínek resp. jestli vůbec je člověk schopen jen na základě poslechu poznat, zda zvuk  $A$  i zvuk  $B$  byly vytvořeny z té samé množiny frekvencí.

#### **3.3.2 experiment**

Experiment, který by nám mohl pomoci najít odpověď na tuto otázku, by mohl vypadat následovně:

Subjekt by měl za úkol rozhodnout, ve které ze dvou dvojic zvuků, které uslyší, jsou si zvuky podobnější. První zvuk v první dvojici by se shodoval s prvním zvukem v druhé dvojici a odpovídal by zvuku  $B$  v předchozím modelu. Druhý zvuk v jedné z dvojic by odpovídal

zvuku A v předchozím modelu. Druhý zvuk v druhé z dvojic by se od druhého zvuku v první z dvojic lišil pouze kmitočty frekvenčních složek, ve všech ostatních parametrech by se oba zvuky shodovaly. Pro několik dalších porovnání by se při zachování frekvencí a tónových výšek měnil poměr ostatních parametrů druhého zvuku první a druhé dvojice (tyto parametry by pro oba zvuky nadále zůstávaly shodné) k ostatním parametrům shodného prvního zvuku obou dvojic (odpovídajícího zvuku B). Pro následné porovnání by se pozměnily kmitočty frekvenčních složek toho druhého zvuku jedné z dvojic, který neodpovídá zvuku A z předchozího modelu. Pro několik dalších porovnání by se při zachování nových frekvencí opět měnil poměr ostatních parametrů druhého zvuku první a druhé dvojice (tyto parametry by pro oba zvuky nadále zůstávaly shodné) k ostatním parametrům shodného prvního zvuku obou dvojic (odpovídajícího zvuku B). Celý tento cyklus by se mohl opakovat pro různé množiny M.

V předchozím odstavci několikrát zmíněné “ostatní parametry” odpovídají těm parametrům zvukům *Désintégrations* a *Allégories*, jejichž hodnoty jsou produktem Murailovy kreativity (viz s. 35). Při nastavování hodnot těchto parametrů pro zvuky, které mají být použity v experimentu, se proto můžeme nechat inspirovat postupy kompozice *Désintégrations* a *Allégories* částečně zrekonstruovanými v kapitole 2.

## 4. Závěr

Primárním cílem této práce bylo v hrubých rysech navrhnout dva experimenty. Lze však podle těchto návrhů experimenty realizovat?

Jak bylo řečeno v úvodu, první experiment (viz kapitolu **3.2.2**) *by mohl zodpovědět* otázku, jaký je vztah mezi sluchovým vjemem vybrané části jedné ze dvou skladeb Tristana Muraile, *Désintégrations* a *Allégories*, a vjemem zvuku, jehož spektrem byla tato část inspirována (motivace této otázky byly vysvětleny – viz kapitoly **3.2.1** a **3.3.1**). *Mohl by zodpovědět* – pokud bychom měli k dispozici zvuky, z jejichž spekter byly vybrány množiny frekvencí pro *Désintégrations* a *Allégories* (tyto zvuky nikdy k dispozici mít nebudeme), nahrávky těchto zvuků (nahrávka zvuku se však původnímu zvuku jen v různé míře blíží – viz s. 41) nebo výsledky jejich fourierovských analýz. Výsledky těchto analýz by sice bylo možné použít jako parametry pro součtovou syntézu, avšak to, jestli bychom touto syntézou získali z fyzikálního hlediska přesné rekonstrukce původní zvuků, zdaleka není jisté. Vždyť právě tato práce se snažila ve vztahu k tzv. “spektrální hudbě” (lépe “spektrálnímu přístupu”) upozornit na nutnost kritického přístupu ke spektru jako věrnému zobrazení fyzikálních parametrů zvuku (viz kapitolu **3.2.1**). Na druhou stranu je však nutné upozornit na to, že odchylka fyzikálních parametrů zvuku zrekonstruovaného z nahrávky či syntézou od fyzikálních parametrů původního zvuku nemusí mít nutně vliv na přesvědčivost rekonstrukce z psychologického hlediska.

V úvodu bylo také řečeno, že druhý experiment (viz kapitolu **3.3.2**) *zodpoví* otázku, jaký je vztah mezi vjemem souzvuku, jehož tónové výšky jsou odvozeny z určité množiny frekvencí, a vjemem zvuku, jehož frekvenční složky mají kmitočty z té samé množiny (i motivace této otázky byla vysvětlena – viz kapitolu **3.3.1**) – realizaci tohoto experimentu nic nebrání.

## 5. Bibliografie

- ANDERSON, J. - MURAIL, T. In Harmony: Julian Anderson Introduces the Music and Ideas of Tristan Murail. *The Musical Times*, June 1993, vol. 134, no. 1804, s. 321 – 323.
- BOULEZ, P. – GERZSO, A. Computers in Music. *Scientific American*, April 1988, vol. 258, no. 4, s. 44 – 50.
- CHOWNING, J. The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1973, vol. 21, no. 7, s. 526 – 534.
- CORNICELLO, A. *Timbral Organization in Tristan Murail's Désintégrations and Rituals by Anthony Cornicello*. Waltham, 2000. A dissertation presented to The Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences Brandeis University Music Program. Advisor David Rakowski.
- DEUTSCH, D. *The Psychology of Music*. 2nd Ed. San Diego: Academic Press, 1999. ISBN-13: 978-0-12-213565-1. ISBN-10: 0-12-213565-2.
- EBERLEIN, R. – AUHAGEN, W. – SCHROEDER, M. R. – EILEMANN, A. Akustik. In *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*. Ludwig Finscher. 2. neubearb. Ausg. Kassel: Bärenreiter – Stuttgart: Metzler, 1994 – 2008. Sachteil. Bd. 1 (A – Bog). Kol. 366 – 421. ISBN-10: 3476410226. ISBN-13: 978-3476410221.
- FRANĚK, M. *Hudební psychologie*. Praha, 2007. ISBN 80-246-0965-7.
- KIRK, R. – HUNT, A. *Digital Sound Processing for Music and Multimedia*. London, 1999. ISBN-10: 0240515064. ISBN-13: 978-0240515069.
- MURAIL, T. Au fil des oeuvres. In *Tristan Murail*. Peter Szendy. Paris: L'Harmattan, 2002. s. 103 – 152. ISBN-10: 2747526542. ISBN-13: 978-2747526548.
- MURAIL, T. *Desintegrations: Pour bande synthétisée et 17 instruments*. Paris: Editions Salabert, 1990.
- MURAIL, T. Spectra and Sprites. Přeložil Tod Machover. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 137 – 147.
- MURAIL, T. Target Practice. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 149 – 171.
- MURAIL, T. The Revolution of Complex Sounds. Přeložil Joshua Cody. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 121 – 135.
- MURAIL, T. Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9 – 11 and 13 July 1992. Přeložil Aaron Berkowitz a Joshua Fineberg. *Contemporary Music Review*, May/June 2005, vol. 24, no. 2/3, s. 187 – 267.
- PUCKETTE, M. Combining Event and Signal Processing in the MAX Graphical Programming Environment. *Computer Music Journal*, vol. 15, no. 3, s. 68 – 77.
- PUCKETTE, M. Pure Data. In *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference*. San Francisco: International Computer Music Association, 1996, s. 269 – 272.
- RISSET, J.-Cl. – WESSEL, D. L. Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis. In *The Psychology of Music*. Diana Deutsch. 2nd Ed. San Diego: Academic Press, 1999. s. 113 – 169. ISBN-13: 978-0-12-213565-1. ISBN-10: 0-12-213565-2.
- SELEBORG, C. *Interaction temps-réel/temps différé: Elaboration d'un modèle formel de Max et implémentation d'une bibliothèque OSC pour OpenMusic*. Mémoire de stage de DEA ATIAM année



- 2003–2004. Paris, 2004. Sous la direction de M. Carlos Agon.
- SMITH, R. B. An Interview with *Tristan Murail*. *Computer Music Journal*, Spring 2000, vol. 24, no. 1, s. 11 – 19.
- SYROVÝ, V. *Malý slovník základních pojmů z hudební akustiky a hudební elektroniky*. Praha, 2001. ISBN 80-85883-80-5.
- VINET, H. Recent Research and Development at IRCAM. *Computer Music Journal*, Fall 1999, vol. 23, no. 3, s. 9—17.

## elektronické zdroje

- MANNING, P. Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique. In *Grove Music Online*. *Oxford Music Online*. <<http://www.oxfordmusiconline.com/subscriber/article/grove/music/42130>> [cit. 2009-08-13].
- Max/MSP/Jitter* [počítačový program]. Ver. 5.0.7. Cycling '74, 2009 [cit. 2009-08-12]. Dostupný za 699 USD z: <<http://www.cycling74.com/products/max5>>.
- Pure Data* [počítačový program]. Ver. 0.41.4. Miller Puckette a další, 2009 [cit. 2009-08-12]. Freeware. Dostupný z: <<http://puredata.info/downloads>>.
- SCHUTTERHOEF, Arie van. *wikiC/2.06: Sogitec 4X* [online]. Modified August 12, 2009 1:25:00 AM [cit. 2009-08-12] <[http://knorretje.hku.nl/wiki/Sogitec\\_4X](http://knorretje.hku.nl/wiki/Sogitec_4X)>.
- Vintage Synth Explorer. *Vintage Synth Explorer - Yamaha TX816* [online]. c1997-2009, Modified August 12, 2009 1:29:11 AM [cit. 2009-08-12] <<http://www.vintagesynth.com/yamaha/tx816.php>>.
- WWW Ircam: Accueil [online]. Modified August 12, 2009 1:17:49 AM [cit. 2009-08-12]. <<http://www.ircam.fr/>>.